



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»**

Препринт 2017–5

И.Л. Ажгирей, В.И. Гаркуша, В.П. Карташев,  
В.Н. Запольский, В.Г. Заручейский

**Формирование пучков поляризованных протонов  
и антипротонов для эксперимента СПАСЧАРМ  
на ускорителе У-70**

**Аннотация**

Ажгирей И.Л. и др. Формирование пучков поляризованных протонов и антипротонов для эксперимента СПАСЧАРМ на ускорителе У-70: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2017–5. – Протвино, 2017. – 15 с., 8 рис., 3 табл., библиогр.: 13.

В работе приводится описание основных параметров канала частиц, разработанного для получения на ускорителе У-70 пучков поляризованных протонов (антипротонов) от распада  $\Lambda(\tilde{\Lambda})$ -гиперонов. Представлены расчетные характеристики поляризованных пучков с импульсами от 15 до 45 ГэВ/с, а также оценки фона  $\pi$ -мезонов.

**Abstract**

Azhgirey I.L. et al. Production of polarized proton and antiproton beams for the SPASCHARM experiment at the U-70 accelerator: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2017–5. – Protvino, 2017. – p. 15, figs. 8, tables 3, refs.: 13.

This paper describes basic properties of the beam line elaborated to produce at the U-70 accelerator polarized proton (antiproton) beams from  $\Lambda(\tilde{\Lambda})$ -hyperons decays. Calculated characteristics of polarized beams with momentum from 15 up to 45 GeV/c are presented along with estimations of  $\pi$ -mesons background.

## Введение

Планируемое повышение интенсивности ускоренного протонного пучка до  $\sim 2 \times 10^{13}$  протонов за цикл открывает новые возможности для проведения физических исследований на ускорительном комплексе НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ. В то же время, перспектива работы с протонным пучком более высокой интенсивности определяет необходимость значительной перестройки существующей в настоящее время системы каналов частиц. С учетом опыта создания и развития каналов частиц, в том числе и в зарубежных ускорительных центрах, в экспериментальной зоне ускорителя У-70 на площадях, освободившихся после завершения ряда экспериментов, планируется создать два новых канала частиц на основе медленного вывода ускоренного протонного пучка с энергией до 60 ГэВ и интенсивностью  $\geq 10^{13}$  протонов за цикл. Создание этих каналов, работающих одновременно с одной внешней мишенью, позволит существенно улучшить эффективность использования ускоренного в У-70 протонного пучка, повысить интенсивность и качество формируемых на экспериментальные установки пучков частиц и, что также немаловажно, отказаться от части внутренних мишеней, эксплуатация которых приводит к переоблучению магнитной системы ускорителя.

Два новых канала, получивших обозначения 24А и 24Б, предназначаются для обеспечения пучками частиц экспериментальных установок СПАСЧАРМ и ВЕС, соответственно. Установка СПАСЧАРМ [1] создается для проведения систематических исследований поляризационных явлений в эксклюзивных и инклюзивных адронных реакциях в области энергий ускорителя У-70. Программой физических исследований в этом эксперименте планируется использование целого ряда пучков различного сорта,

в первую очередь пучков поляризованных протонов (антипротонов), пучков положительно и отрицательно заряженных пионов, а также пучков электронов, необходимых для калибровки аппаратуры экспериментальной установки.

Метод получения на ускорителях пучков поляризованных протонов (антипротонов) от распада  $\Lambda(\bar{\Lambda})$ -гиперонов, предложенный в работе [2], был впервые реализован на 800 ГэВ-ном ускорителе ФНАЛ для создания пучка с импульсом 185 ГэВ/с [3]. Впоследствии пучок поляризованных протонов с импульсом 40 ГэВ/с был получен на 70 ГэВ-ном ускорителе ИФВЭ, где с этой целью была адаптирована магнитооптическая система существующего канала многоцелевого назначения [4].

В данной работе приводятся результаты разработки магнитооптической системы канала 24А, оптимизированной для получения пучков поляризованных частиц, приводятся характеристики формируемых на установку СПАСЧАРМ пучков. Рассмотрению характеристик канала предшествует описание мишенной станции, обеспечивающей одновременную работу каналов 24А и 24Б с одной мишенью.

## 1. Мишенная станция каналов 24А и 24Б

Мишенная станция каналов 24А и 24Б (рис. 1) включает в себя три дипольных магнита, первые два из которых (МТ1 и МТ2) предназначены для наведения первичного протонного пучка под некоторым углом  $\varphi$  в центр магнита МТ3, который, в свою очередь, обеспечивает отбор вторичных частиц, рожденных в мишени Т, одновременно в оба канала. Подобные трехмагнитные системы отбора вторичных частиц с одной мишени одновременно в два или три канала были применены в экспериментальных зонах ускорителя SPS в CERN [5].

В качестве магнитов МТ1 и МТ2 планируется использовать дипольные магниты типа СП-129 и СП-7, входящие в номенклатуру оборудования экспериментального комплекса ускорителя У-70. В этом случае максимальный угол наведения протонного пучка на мишень  $\varphi_{max}$ , определяемый параметрами магнита СП-7А ( $L = 6$  м,  $B_{max} = 1.8$  Тл, ширина рабочей области 500 мм), равен 27 мрад. Под этим же углом «смотрят» в центр магнита МТ3 каналы 24А и 24Б, что позволяет максимально приблизить к мишени квадрупольные линзы, входящие в состав головных объективов обоих каналов,

сохраняя при этом возможность отбора в оба канала нейтральных вторичных частиц с нулевым углом рождения в мишени.

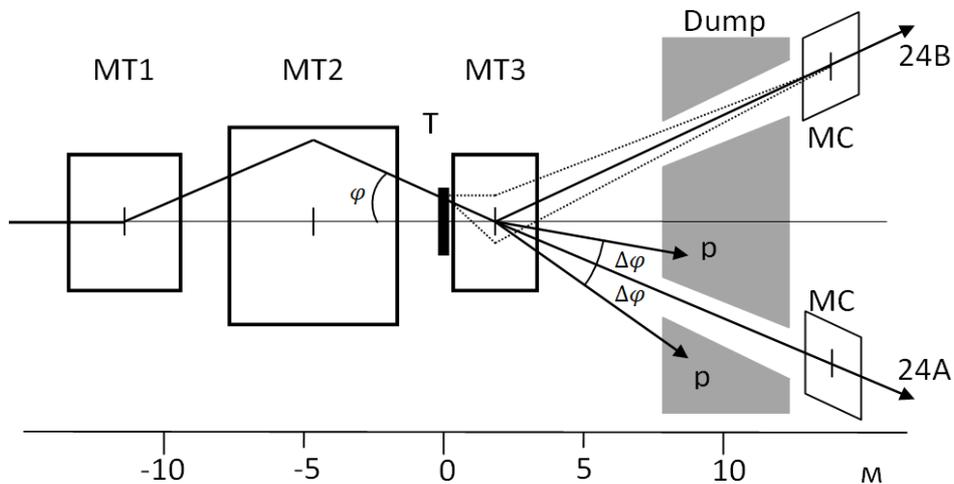


Рис. 1. Схема мишенной станции каналов 24А и 24Б. Т – мишень, МТ1÷МТ3 – дипольные магниты, МС – магниты-корректоры, Dump - поглотитель. Приведенный на схеме вариант наведения протонного пучка на мишень соответствует отбору нейтральных вторичных частиц в канал 24А и положительно (отрицательно) заряженных частиц в канал 24Б. Пунктирными линиями показаны траектории вторичных заряженных частиц, отбираемых в канал 24Б с ненулевыми углами рождения в мишени.

Являясь функциональным элементом мишенной станции каналов 24А и 24Б, магнит МТ3 в то же время используется для очистки от заряженных частиц направлений того или другого канала при формировании в нем пучков поляризованных протонов (антипротонов) от распада  $\Lambda(\tilde{\Lambda})$ -гиперонов, а также пучков электронов. В связи с этим основные параметры магнита МТ3 ( $L = 2.6$  м,  $B_{max} = 1.9$  Тл, размеры рабочей области  $H \times V = 140 \times 56$  мм<sup>2</sup>) являются компромиссом достаточно противоречивых требований к его длине при максимально высоком значении магнитного поля.

Конструкция расположенного непосредственно после мишени магнита МТ3 определяется необходимостью долговременной работы в условиях высоких радиационных нагрузок, приводящих к разрушению изоляции обмоток возбуждения. Известными вариантами решения этой проблемы является использование значительно более стойкой к воздействию радиации асбоцементной или MgO изоляции обмоток [6,7]. Ввиду сложности и относительно высокой стоимости изготовления таких обмоток в нашем

случае единичного производства предпочтение было отдано компоновке магнита с отнесенной вверх от плоскости пучка обмоткой возбуждения [8], изготовленной методом вакуумной пропитки эпоксидным компаундом. Поперечное сечение магнита МТЗ в выбранной компоновке показано на рис. 2.

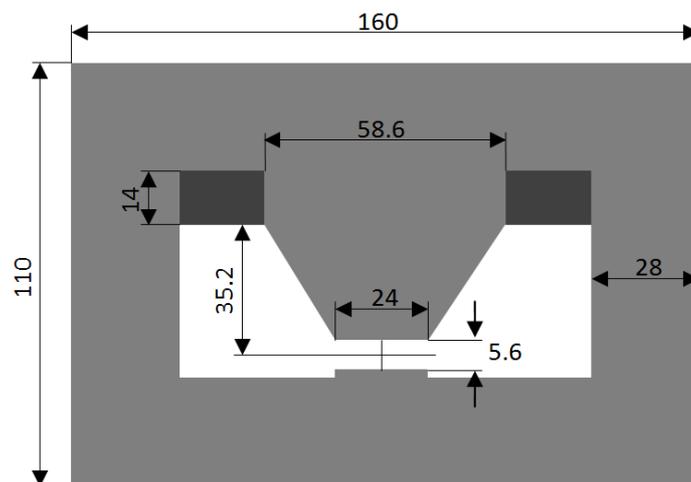


Рис. 2. Схема поперечного сечения магнита МТЗ. Все размеры приведены в см.

Как следует из расчетов мощности дозы, проведенных с использованием программы MARS [9], ресурс обмотки магнита (время набора дозы 10 МГр) составляет ~300 суток. Дополнительная защита в виде бетона, заполняющего пространства внутри ярма магнита от нижнего полюса до обмотки и стальных пластин, затеняющих выступающие части обмоток, повышает ее ресурс до 2600 суток, что решает основную проблему эксплуатации этого магнита в условиях высоких радиационных нагрузок.

В расчетах мощности дозы и параметров формируемых пучков частиц предполагалось, что алюминиевая мишень длиной 0.4 м и толщиной 3.0 мм размещена вплотную к входному торцу магнита МТЗ. Ширина мишени составляет ~100 мм, что позволяет не перемещать мишень в горизонтальной плоскости при изменении угла наведения протонного пучка в пределах  $\pm 27$  мрад.

Приведенная на рис. 1 симметричная относительно направления исходного протонного пучка схема мишенной станции обеспечивает эквивалентные условия для отбора вторичных частиц в направлении обоих каналов. При этом:

- при отборе по направлению одного из каналов пучка нейтральных вторичных частиц ( $\varphi = \pm \varphi_{max}$ ), во втором канале может быть получен пучок положительных или отрицательно заряженных вторичных частиц в диапазоне импульсов от

16 до 28 ГэВ/с с нулевым углом рождения в мишени. Нижняя граница этого диапазона определяется из условия гашения в поглотителе непровзаимодействовавшего в мишени протонного пучка (который после отклонения в магните МТЗ не должен попадать в интервал углов  $\varphi_{max} \pm \Delta\varphi$ ), тогда как верхняя граница – максимальным интегралом магнитного поля в МТЗ;

- при наведении протонного пучка на мишень с углом  $|\varphi| < \varphi_{max}$  в каналы 24А и 24Б будут отбираться заряженные вторичные частицы с разными знаками заряда. Связь между импульсами этих пучков при нулевом угле рождения в мишени определяется выражением  $p_2(\varphi_{max} - \varphi) = -p_1(\varphi_{max} + \varphi)$ , в котором  $p_1$  и  $p_2$  являются алгебраическими величинами, т.е. отрицательное значение импульса соответствует отрицательно заряженным частицам. Как и в предыдущем случае, гашение непровзаимодействовавшего в мишени протонного пучка накладывает существенные ограничения на отбор в каналы заряженных вторичных частиц с нулевым углом рождения в мишени.

Применение в составе мишенной станции магнитов-корректоров МС позволяет заметно расширить диапазон импульсов заряженных частиц в обоих каналах за счет отбора с мишени частиц с ненулевым углом рождения в мишени.

## **2. Оптическая схема канала поляризованных протонов (антипротонов)**

Основная оптическая схема канала поляризованных протонов (антипротонов) 24А была разработана с учетом ряда ограничений, определяемых планируемым размещением этого канала на площадях существующей экспериментальной базы ускорителя У-70, освободившихся после завершения других экспериментов. Тем не менее, предлагаемая оптическая схема (рис. 3), состоящая из двух зеркально-симметричных частей, разделенных промежуточными изображениями (фокусами) пучка в обеих поперечных плоскостях в середине канала, удовлетворяет основным требованиям, связанным с особенностями создания такого канала [10].

Поглощение непровзаимодействовавших в мишени первичных протонов и рожденных в мишени заряженных вторичных частиц осуществляется в пределах мишенной станции канала (рис. 1), а нейтральных частиц, большую часть которых составляют нейтроны, во втором поглотителе, расположенном между магнитами М1 и М2 на рас-

стоянии 6 м от центра магнита М1, угол поворота пучка в котором составляет 52 мрад. Телесный угол попадающих в канал нейтральных частиц ограничивается коллиматорами С1 и С2 таким образом ( $\pm 2.8$  мрад и  $\pm 3.2$  мрад соответственно), чтобы предотвратить возможность взаимодействия нейтронов со стенками вакуумных камер в квадрупольных линзах Q1÷Q3 и в магните М1, стремясь исключить тем самым один из источников фона в пучке поляризованных частиц, главным образом антипротонов.

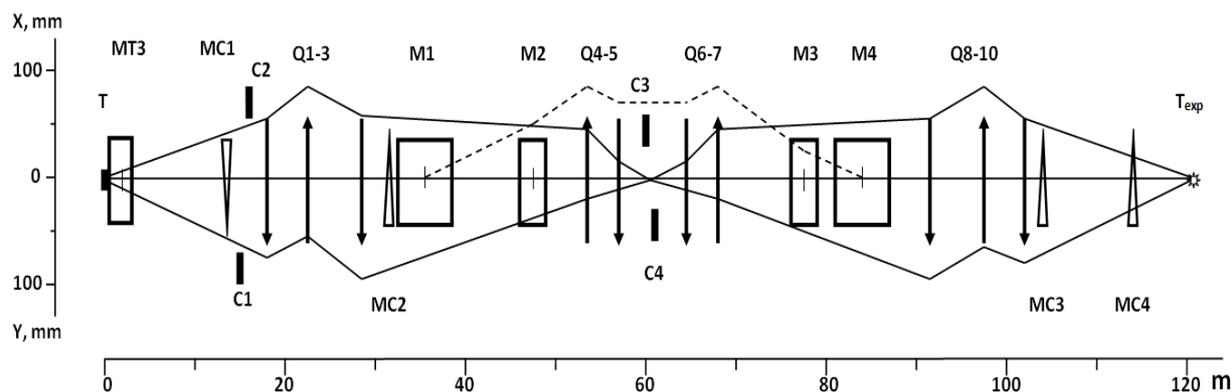


Рис. 3. Основная оптическая схема канала 24А, предназначенная для формирования пучков поляризованных протонов (антипротонов) от распада  $\Lambda(\bar{\Lambda})$ -гиперонов. Q – квадрупольные линзы, М – дипольные магниты, С – коллиматоры, МС – магниты-корректоры, Т и Т<sub>exp</sub> – мишени канала и экспериментальной установки. Сплошными линиями показана фокусировка пучка в обеих поперечных плоскостях, штриховыми – дисперсия в горизонтальной плоскости для  $\Delta p/p = 10\%$ .

Для анализа пучка по импульсам используется промежуточное изображение в горизонтальной плоскости, дисперсия в котором величиной 7.1 мм/% создается магнитами М1 и М2 и затем компенсируется через квадрупольные линзы Q4÷Q7 магнитами М3 и М4 (магниты М1÷М4 отклоняют трассу канала в одну сторону на общий угол 147 мрад), а требуемый разброс по импульсам  $\Delta p/p$  формируемого пучка определяется раскрытием коллиматора С3. Участки канала до и после максимально сближенных с этой целью магнитов М3 и М4 планируется использовать для размещения детекторов системы измерения импульса частиц.

Вертикальная плоскость оптической схемы канала имеет единичную матрицу преобразования параметров траектории частиц от мишени канала до мишени экспериментальной установки, что обеспечивает в линейном приближении по поперечным

параметрам траекторий сохранение вертикального компонента вектора поляризации протонов ( $\Delta\xi_y = 0$ ) для всех режимов работы канала. Наличие корреляции между координатой частицы в вертикальной плоскости  $y$  и компонентом вектора поляризации  $\xi_y$  в промежуточном изображении пучка<sup>1</sup> предполагается использовать для организации здесь системы мечения поляризации частиц или для выделения с помощью коллиматора С4 части пучка с ненулевой средней поляризацией частиц. Во втором случае корректирующий магнит МС2 используется для смещения пучка на коллиматоре С4, а корректирующие магниты МС3 и МС4 – для выведения выделенной части пучка на ось экспериментальной установки (разд. 4).

Для создания канала 24А планируется использовать магнитооптическое оборудование экспериментального комплекса ускорителя У-70: квадрупольные линзы типа 20К200 длиной 2 м с максимальным градиентом магнитного поля 13 Тл/м в апертуре диаметром 200 мм и отклоняющие магниты типа СП-7А и СП-12А длиной 6 м и 3 м, соответственно, с максимальным полем 1.8 Тл в рабочей области  $H \times V = 500 \times 200$  мм<sup>2</sup>, а также коллиматоры частиц с максимальным раскрытием  $\pm 75$  мм.

Максимальный импульс формируемого пучка при использовании основной оптической схемы (рис. 3) составляет 45 ГэВ/с. Другие характеристики канала в режиме формирования пучков поляризованных протонов (антипротонов) от распада  $\Lambda(\bar{\Lambda})$ -гиперонов, включая минимальный и максимальный разброс пучка по импульсам, а также угловой аксептанс в обеих поперечных плоскостях, существенно зависят от размеров эффективного источника протонов, которые в свою очередь являются функцией импульса частиц. Так, минимальный (максимальный) разброс пучка по импульсам в канале изменяется от  $\pm 4.5\%$  ( $\pm 11.0\%$ ) для пучка с импульсом 15 ГэВ/с до  $\pm 3.0\%$  ( $\pm 9.5\%$ ) для пучка с импульсом 45 ГэВ/с.

<sup>1</sup> Характерной особенностью эффективного источника частиц, т.е. совокупности приведенных к центру мишени траекторий протонов (антипротонов) от распада  $\Lambda \rightarrow p\pi$  на участке от магнита МТ3 до первого объектива канала, является наличие корреляции между поперечными координатами частиц и соответствующими компонентами вектора поляризации. Помимо кинематики распада  $\Lambda$ -гиперонов величина корреляции зависит также от размеров мишени, разброса по импульсам захватываемого в канал протонного пучка и структуры начальной части канала [10]. Захват в канал протонов, образовавшихся от распада  $\Lambda$ -гиперонов на выходе из магнита МТ3, заметно снижает величину коэффициента корреляции в плоскости действия очищающего магнита (в нашем случае горизонтальной).

Модифицированная оптическая схема канала с включенными по дублетной схеме первым и последним объективами обеспечивает транспортировку пучков частиц с импульсом до 60 ГэВ/с, что позволяет доставлять к экспериментальной установке СПАСЧАРМ первичный протонный пучок пониженной интенсивности, выведенный из ускорителя У-70 с помощью изогнутого кристалла [11].

Канал 24А может быть использован также для формирования и транспортировки к экспериментальной установке пучков вторичных частиц обоих знаков заряда. В этом случае ввиду существенно меньших размеров источника частиц, не зависящих от импульса формируемого пучка, минимальный возможный разброс пучка по импульсам в канале 24А составляет  $\pm 1.2\%$ .

### **3. Параметры пучков поляризованных протонов в промежуточном изображении канала**

Размеры пучка в промежуточном изображении (в вертикальной плоскости) определяются размерами эффективного источника протонов и коэффициентом матрицы преобразования ( $y/y_0$ ) от мишени до этого сечения канала, который в рассматриваемой схеме может варьироваться в достаточно широких пределах с сохранением единичности полной матрицы преобразования канала. Это позволяет иметь в промежуточном изображении неизменные размеры пучка в вертикальной плоскости при формировании пучков поляризованных протонов с разными импульсами (табл. 1). Размеры пучка приведены для минимального и максимального (в скобках) значения  $\Delta p/p$ , пропускаемого каналом.

Таблица 1.

Импульс пучка, ГэВ/с	15	30	45
Размер эффективного источника протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	13.8	10.0	8.5
Коэффициент увеличения ( $y/y_0$ )	1.40	2.00	2.40
Размер пучка протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	20.6 (22.1)	20.9 (21.9)	21.2 (21.7)
Размер пучка протонов в горизонтальной плоскости ( $\sigma_x$ ), мм	10.0 (32.2)	7.7 (37.0)	6.6 (35.0)

Связь между координатами протонов в вертикальной плоскости и средними в пределах канала гистограммы значениями компонента  $\xi_y$  вектора поляризации, используемая для мечения поляризации отдельных частиц, представлена на рис. 4 для протонного пучка с импульсом 45 ГэВ/с. Коэффициент корреляции между этими величинами составляет 0.83 для пучка с  $\sigma_{\Delta p/p} = 1.2\%$  и 0.78 для пучка с  $\sigma_{\Delta p/p} = 4.1\%$ .

Приведенные здесь и далее результаты расчетов параметров формируемых пучков получены с использованием программы DECAУ TURTLE [12], модифицированной для моделирования пучков поляризованных протонов (антипротонов) от распада  $\Lambda(\tilde{\Lambda})$ -гиперонов с использованием данных о рождении этих частиц, приведенных в работе [13]. Расчеты интенсивности пучков проводились для падающего на мишень канала протонного пучка с энергией 60 ГэВ и интенсивностью  $10^{13}$  протонов за цикл (ppp).

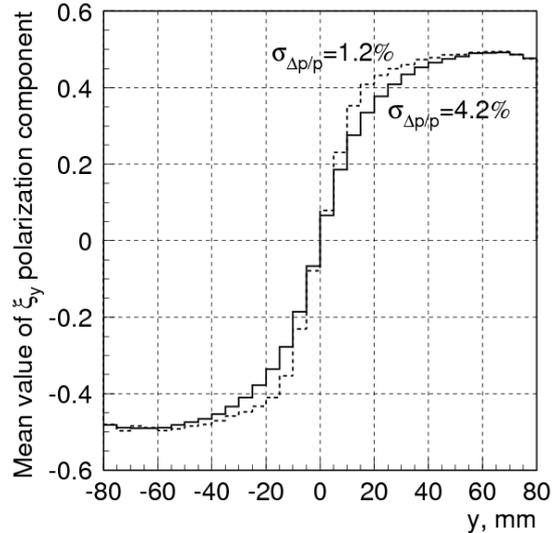


Рис. 4. Связь между  $y$ -координатами протонов и средними значениями  $\xi_y$  компонента вектора поляризации в промежуточном изображении канала для пучка с импульсом 45 ГэВ/с.

#### 4. Параметры пучков поляризованных протонов в конце канала

Результаты расчета параметров пучков поляризованных протонов в конце канала (на мишени экспериментальной установки), включая их поперечные размеры и расходимости, интенсивность, а также интенсивность фоновых  $\pi^+$ -мезонов от распада  $K_S^0$ -мезонов, приведены в табл. 2 для трех значений импульса формируемого пучка при минимальном и максимальном разбросе по импульсам. В качестве примера на рис. 5 приведены его профили на мишени экспериментальной установки для пучка с импульсом 45 ГэВ/с и  $\sigma_{\Delta p/p} = 1.2\%$ .

Таблица 2.

$p$ , ГэВ/с	15		30		45	
$\sigma_{\Delta p/p}$ , %	2.0	4.5	1.4	4.4	1.2	4.2
$\sigma_x \times \sigma_y$ , мм	$17 \times 14$	$19 \times 16$	$14 \times 10$	$17 \times 11$	$11 \times 8.7$	$16 \times 9.0$
$\sigma_{x'} \times \sigma_{y'}$ , мрад	$1.4 \times 1.5$	$1.3 \times 1.5$	$1.5 \times 1.8$	$1.3 \times 1.8$	$1.4 \times 1.7$	$1.4 \times 1.7$
$I_{p(\lambda)} / 10^{13}$ ppp	$3.5 \times 10^6$	$9.2 \times 10^6$	$2.1 \times 10^7$	$7.8 \times 10^7$	$1.5 \times 10^7$	$6.8 \times 10^7$
$I_{\pi^+(K_S^0)} / 10^{13}$ ppp	$3.8 \times 10^5$	$1.1 \times 10^6$	$3.5 \times 10^5$	$1.4 \times 10^6$	$1.3 \times 10^4$	$7.6 \times 10^4$

Из приведенных в табл. 2 результатов следует, что:

- размеры пучка на мишени экспериментальной установки и минимальный разброс пучка по импульсам уменьшаются с повышением импульса пучка частиц, что определяется, в основном, уменьшением размеров эффективного источника протонов при: (а) единичных коэффициентах линейного увеличения канала в обеих поперечных плоскостях; (б) постоянном коэффициенте линейного увеличения и импульсной дисперсии пучка в промежуточном изображении по горизонтали;
- примесь  $\pi^+$ -мезонов от распадов  $K_S^0$ -мезонов в формируемом на экспериментальную установку пучке не превышает 10-12% для 15 ГэВ/с и быстро уменьшается с повышением импульса пучка, являясь основным источником фона в пучке поляризованных протонов при условии эффективной очистки направления канала от рожденных в мишени  $\pi^+$ -мезонов и протонов. При формировании поляризованных пучков с импульсами  $\geq 30$  ГэВ/с это обеспечивается только при близких к максимуму режимах магнита МТЗ (разд. 1).

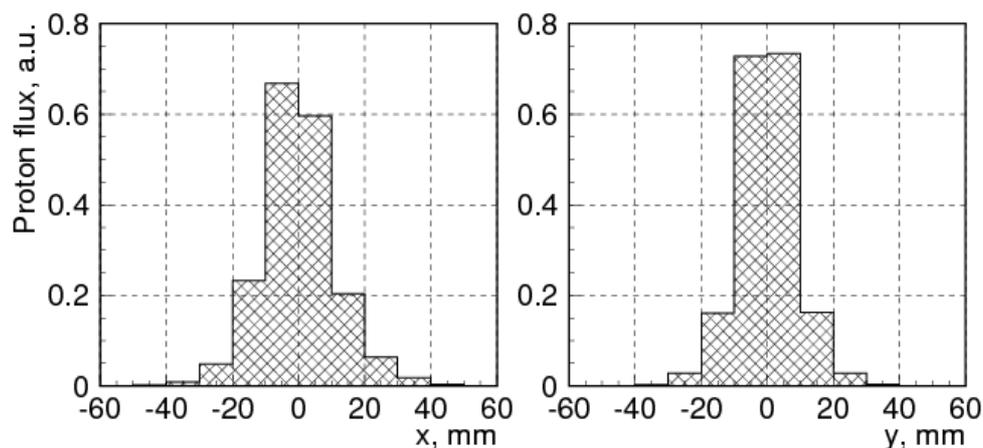


Рис. 5. Профили пучка на мишени экспериментальной установки для пучка с импульсом 45 ГэВ/с и  $\sigma_{\Delta p/p} = 1.2\%$ .

В силу единичности полной матрицы преобразования канала в вертикальной плоскости корреляция между координатами частиц и  $\xi_y$  компонентом вектора поляризации, присущая эффективному источнику протонов, имеет место также в сформированном на мишень экспериментальной установки протонном пучке. При этом средняя по пучку поляризация протонов равна нулю. Для мечения поляризации отдельных частиц может быть использована связь между величинами  $y$  и  $\xi_y$  в промежуточном изображении канала (рис. 4).

Простейшим способом получения на мишени экспериментальной установки поляризованного пучка с заданным направлением вектора поляризации, является выделение части пучка с отличной от нуля средней поляризацией вертикальным коллиматором, расположенным в промежуточном изображении. С этой целью пучок в промежуточном изображении смещается корректирующим магнитом МС2 по вертикали в ту или другую сторону параллельно оси канала перед коллиматором С4 с фиксированным заданным раскрытием щек. Такой вариант, не требующий перемещения щек коллиматора, позволяет быстро (в пределах от цикла к циклу ускорителя) осуществлять реверс поляризации пучка на мишени экспериментальной установки, сохраняя при этом эксплуатационный ресурс используемого коллиматора. Параметры протонного пучка с импульсом 45 ГэВ/с и  $\sigma_{\Delta p/p} = 1.2\%$  на мишени экспериментальной установки при раскрытии коллиматора С4, равном  $\pm 10$  мм, приведены в табл. 3 для ряда режимов корректирующего магнита МС2.

Таблица 3.

$(BL)_{МС2}$ , Тл×м	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15
$\bar{y}$ , мм	-0.16	-0.69	-0.99	-0.89	-0.87
$\bar{y}'$ , мрад	-0.31	-0.52	-0.67	-0.85	-1.02
$\xi_y$	$-0.22 \pm 0.20$	$-0.37 \pm 0.16$	$-0.45 \pm 0.13$	$-0.48 \pm 0.12$	$-0.50 \pm 0.12$
$I_{p(A)} / 10^{13}$ ppp	$5.9 \times 10^6$	$4.5 \times 10^6$	$2.7 \times 10^6$	$1.5 \times 10^6$	$8.3 \times 10^5$

В этом режиме работы канала размер пучка на мишени экспериментальной установки в вертикальной плоскости уменьшается до  $\sigma_y \approx 2.5$  мм при неизменных других параметрах пучка, приведенных в табл. 2. При смене полярности корректирующего магнита МС2 средние координата  $\bar{y}$  и угол падения пучка  $\bar{y}'$  на мишени в вертикальной

плоскости, а также  $\xi_y$  компонент вектора поляризации меняют знак на противоположный (рис. 6). Для сведения выделенных поочередно частей пучка на ось экспериментальной установки используются корректирующие магниты МС3 и МС4 (рис. 3).

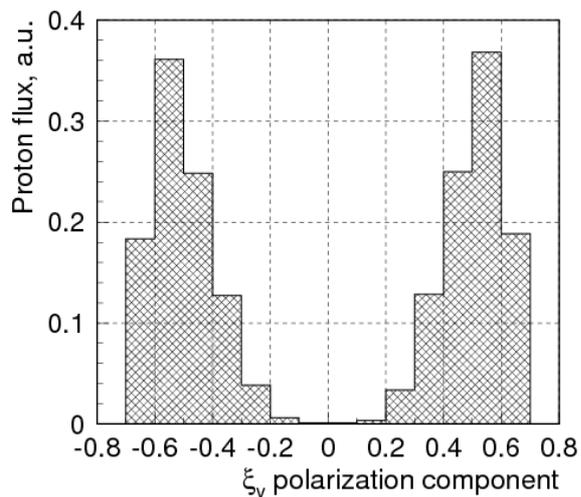


Рис. 6. Поляризация протонного пучка с импульсом 45 ГэВ/с на мишени экспериментальной установки для режимов корректора МС2, равных  $\pm 0.15$  Тл $\times$ м при  $C4 = \pm 10$  мм.

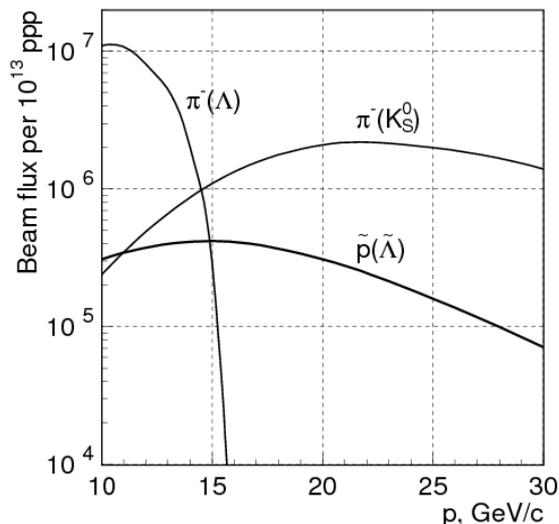


Рис. 7. Интенсивности антипротонов и фоновых  $\pi^-$ -мезонов в конце канала как функции центрального импульса формируемого пучка, рассчитанные при максимальном  $\Delta p/p$ .

## 5. Параметры пучков поляризованных антипротонов

Параметры эффективного источника антипротонов от распада  $\tilde{\Lambda}$ -гиперонов, а, следовательно, такие параметры формируемого антипротонного пучка, как размеры, расходимость, разброс по импульсам, корреляция между координатами частиц и соответствующими компонентами вектора поляризации в промежуточном изображении, полностью идентичны приведенным выше параметрам протонного пучка (табл. 1 и 2, рис. 4). При этом интенсивность пучка антипротонов в конце канала (рис. 7) значительно меньше интенсивности протонного пучка, что определяется меньшим сечением рождения  $\tilde{\Lambda}$ -гиперонов по сравнению с  $\Lambda$ -гиперонами. Так, интенсивность антипротонного пучка с импульсом 15 ГэВ/с, получаемая при максимальном  $\Delta p/p$ , примерно в 20 раз меньше интенсивности протонного пучка с тем же импульсом. С повышением

импульса формируемого пучка разница в интенсивностях протонного и антипротонного пучков существенно возрастает.

Видно также, что помимо  $\pi^-$ -мезонов от распадов  $K_S^0$ -мезонов в пучке антипротонов с импульсом  $<15$  ГэВ/с присутствует значительное количество этих частиц от распада  $\Lambda$ -гиперонов. В результате наиболее оптимальным по отношению интенсивности фоновых  $\pi^-$ -мезонов к интенсивности антипротонов является пучок с импульсом  $16$  ГэВ/с, при котором интенсивность фоновых  $\pi^-$ -мезонов только в  $3$  раза выше интенсивности антипротонного пучка, составляющей  $4 \times 10^5$  частиц за цикл.

Интенсивность формируемого пучка поляризованных антипротонов (в том числе и фоновых  $\pi^-$ -мезонов от распадов  $K_S^0$ -мезонов) существенным образом зависит от длины магнита МТЗ. Однако повышение интенсивности антипротонного пучка за счет применения в составе мишенной станции каналов  $24А$  и  $24Б$  магнита меньшей длины связано с ухудшением очистки направления канала  $24А$  от заряженных вторичных частиц при формировании пучков поляризованных частиц с импульсом  $\geq 30$  ГэВ/с, а также с уменьшением максимального импульса вторичных частиц, отбираемых в канал  $24Б$  с нулевым углом рождения. Тем не менее, повысить интенсивность формируемого поляризованного пучка антипротонов можно путем использования дополнительной мишени, которая *на время приоритетной работы канала  $24А$  с антипротонным пучком* вводится в зазор магнита МТЗ, сокращая при этом длину магнитного поля, очищающего направление канала от заряженных вторичных частиц. Основная мишень каналов  $24А$  и  $24Б$  при этом выводится из пучка, что заметно ухудшает условия для отбора вторичных частиц в канал  $24Б$ .

Размещение второй мишени таким образом, чтобы ее центр находился на расстоянии  $\sim 0.7$  м от входного торца МТЗ, поле в котором при этом близко к максимальному значению  $1.9$  Тл, позволяет в  $2.5$  раза повысить интенсивность поляризованного пучка антипротонов с импульсом  $16$  ГэВ/с (до  $10^6$  частиц за цикл) при опережающем  $3.5$  кратном увеличении интенсивности  $\pi^-$ -мезонов от распадов  $K_S^0$ -мезонов. Дальнейшее увеличение интенсивности антипротонного пучка за счет более «глубокого» положения второй мишени внутри МТЗ нецелесообразно из-за неприемлемого увеличения

фона  $\pi^-$ -мезонов, рождающихся в этой мишени и проходящих по каналу 24А до экспериментальной установки (рис. 8).

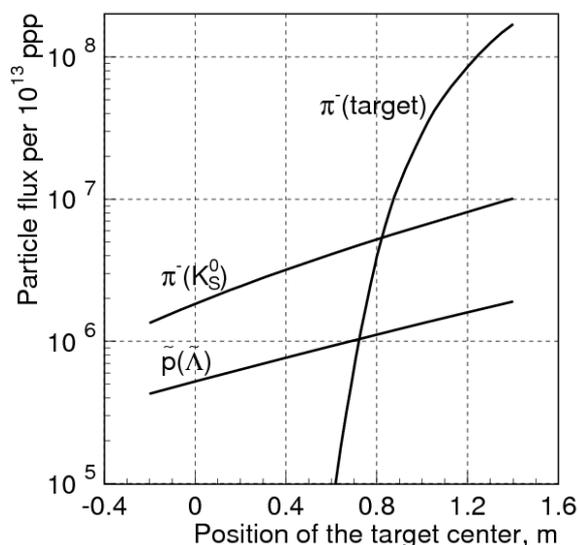


Рис. 8. Зависимость интенсивности частиц в конце канала от положения дополнительной мишени относительно входного торца магнита МТЗ для пучка с импульсом 16 ГэВ/с и максимальным  $\Delta p/p$ . Координата центра мишени  $-0.2$  м соответствует положению основной мишени каналов 24А и 24Б.

### Заключение

Создание на ускорителе У-70 канала частиц, предназначенного для получения на экспериментальной установке СПАСЧАРМ поляризованных протонов (антипротонов) от распада  $\Lambda(\tilde{\Lambda})$ -гиперонов, позволит значительно расширить проводимую в ИФВЭ программу исследований поляризационных явлений в адронных реакциях. При этом, наряду с пучками поляризованных частиц разработанный канал может быть использован для формирования пучков вторичных частиц обоих знаков заряда и пучков электронов в диапазоне импульсов от 10 до 45 ГэВ/с, а также выведенного из ускорителя пучка протонов пониженной интенсивности с импульсом до 60 ГэВ/с.

Оптимизация основных параметров магнитооптической системы канала поляризованных протонов (антипротонов) проводилась в рамках, ограниченных доступностью площадей экспериментальной базы ускорителя У-70 для размещения самого канала и установки СПАСЧАРМ, а также необходимостью обеспечить одновременную работу с одной мишенью двух каналов частиц.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.В. Абрамову, А.Н. Васильеву, В.В. Мочалову, С.Б. Нурушеву, П.А. Семенову и В.Л. Рыкову за полезные обсуждения и постоянный интерес к этой работе.

Работа подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-02-00667).

### Список литературы

- [1] Mochalov V. et al. Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. **40**. 2016. P. 1660106. DOI: 10.1142/S201019451660106X.
- [2] Overseth O. and Sandweiss J. Proc. of NAL 1969 Summer Study. 1969. Report **SS-118**.
- [3] Grosnick D. et al. Nucl. Instr. and Meth. **A290**. 1990. P. 269.
- [4] Galyaev N. et al. Proc. of 1993 PAC, Washington DC, USA. 1993. V. 1. P. 454.
- [5] Reinharz M. et al. CERN SPS Experimenters' Handbook. 1981.
- [6] Keizer R. and Mottier M. Preprint CERN **82-05**, 1982.
- [7] Afanasev V. et al. Preprint IHEP **87-70**, 1987.
- [8] Otter A. and Hojvat C. Proc. of X Int. Conf. on Magn. Techn., Boston, USA. 1987. P.847.
- [9] Azhgirey I. and Talanov V. Proc. of XVIII Workshop on the Charged Particle Accelerators, Protvino. 2000. V. 2. P. 184.
- [10] Garkusha V. et al. Preprint IHEP **86-147**, 1986.
- [11] Afonin A. et al. Phys. of Part. and Nucl. **68**. 2005. P. 1025-1033. DOI: 10.1134/1.1954829.
- [12] Brown K. and Iselin Ch. Preprint CERN **74-2**, 1974.
- [13] Skubic P. et.al. Phys. Rev. **D18**. 1978. P. 3115.

*Рукопись поступила 13 сентября 2017 г.*

И.Л. Ажгирей и др.

Формирование пучков поляризованных протонов и антипротонов для эксперимента СПАСЧАРМ на ускорителе У-70.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 18.09.2017.                      Формат 60 × 84/16.                      Цифровая печать.

Печ.л. 1,25.    Уч.– изд.л. 1,63.                      Тираж 80.                      Заказ 7.                      Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

ww.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

