



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

ИФВЭ 2009-22  
ОЭФ

В.В. Мочалов, А.Н. Васильев, А.В. Рязанцев, П.А. Семенов,  
Ю.М. Гончаренко, А.А. Деревщиков, А.С. Константинов,  
В.А. Майшеев, Ю.А. Матуленко, Ю.М. Мельник,  
А.В. Минченко, А.П. Мещанин, Д.А. Морозов,  
Л.Ф. Соловьев, А.Е. Якутин, Ю.А. Чесноков

**ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РАЗБРОСА ПРОТОННОГО  
ПУЧКА, ВЫВЕДЕННОГО ИЗ УСКОРИТЕЛЯ У-70  
МЕТОДОМ КАНАЛИРОВАНИЯ**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 2009

**Аннотация**

Мочалов В.В. и др. Измерение импульсного разброса протонного пучка, выведенного из ускорителя У-70 методом каналирования: Препринт ИФВЭ 2009–22. – Протвино, 2009. – 16 с., 14 рис., 2 табл., библиогр.: 9.

Впервые измерен импульсный разброс пучка протонов, выведенного из вакуумной камеры ускорителя У-70 методом каналирования. При угле изгиба монокристалла кремния 80 мрад достигнуты следующие параметры пучка: интенсивность  $10^7$  протонов/с при сбросе на кристалл  $10^{12}$  протонов/с, импульсный разброс пучка  $\Delta p/p=0.13\%$ , количество фоновых частиц не превышает 0.03%.

**Abstract**

Mochalov V.V. et al. Measurement of Momentum Dispersion of a Proton Beam Extracted from the Accelerator U-70 by Channeling: IHEP Preprint 2009–22. – Protvino, 2009. – p. 16, figs. 14, tables 2, refs.: 9.

The measurement of momentum dispersion of a proton beam extracted from the accelerator U-70 by channeling has been carried out for the first time. The bending angle of the silicon crystal was 80 mrad. The beam parameters turned out to be as follows. The proton beam intensity was  $10^7$  per second when  $10^{12}$  protons/sec hit the silicon crystal. The beam dispersion was  $\Delta p/p=0.13\%$ . A background particle admixture in the beam was less than 0.03%.

## Введение

Начиная с 1989 года в ГНЦ ИФВЭ проводились работы по выводу протонного пучка непосредственно из вакуумной камеры ускорителя методом каналирования с использованием изогнутого монокристалла кремния [1], [2]. Этот метод был специально разработан для проведения исследований на поляризованной протонной мишени экспериментальной установки ПРОЗА-М [3].

Одним из основных требований к пучку является его стабильность. Требуемая стабильность точности наведения протонного пучка на мишень на уровне долей миллиметра была достигнута после проведения специальных исследований и модернизации системы наведения пучка на кристалл [4].

Несмотря на то, что размер пучка и его интенсивность косвенно указывали на получение чистого пучка протонов в канале, измерений импульсного разрешения и состава пучка ранее не проводилось из-за отсутствия необходимого оборудования в канале 14. По оценкам с учётом характеристик пучка внутри кольца ускорителя У-70, импульсный разброс пучка составляет  $\approx 10^{-3}$ .

Основная цель проведенных измерений – оценить правильность теоретических расчетов параметров протонного пучка, выводимого в зону каналов 2Б/14. Исходя из этой цели, решались следующие основные задачи:

- обеспечение вывода протонного пучка через изогнутый кристалл кремния в канале частиц 2Б/14 с низкой интенсивностью (от  $10^3$  до  $3 \cdot 10^5$ ) протонов за сброс (требование достаточно низкой интенсивности пучка обусловлено

использованием в магнитном спектрометре дрейфовых камер с относительно большим дрейфовым промежутком);

- измерение характеристик протонного пучка, а именно импульсного разброса пучка протонов и оценка примеси фоновых частиц в пучке.

### Экспериментальная установка

Исследования проводились на канале 2Б, имеющем общую с каналом 14 магнитную систему в головной части канала и общие кристаллические дефлекторы, т.е. одинаковые условия вывода пучка. Выбор канала определялся наличием трековой системы для прецизионного измерения энергетического разрешения [5], позволяющей проводить измерения импульса с разрешением 0.13% при энергии 45 ГэВ [6].

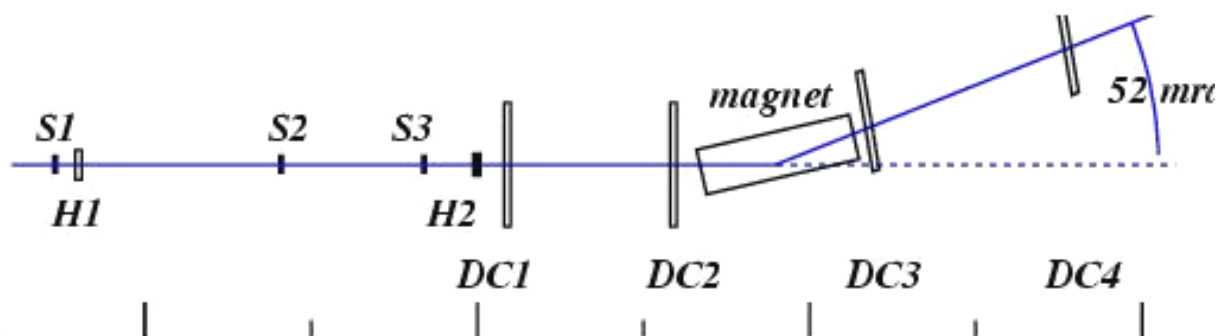


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: S1-S3 – сцинтилляционные счетчики; H1-H2 – волоконные годоскопы; DC1-DC4 – станции дрейфовых камер; magnet – спектрометрический магнит.

Схема экспериментальной установки для исследования характеристик пучка приведена на Рис. 1. В состав установки входят:

- триггерные сцинтилляционные счетчики S1-S3;
- два пучковых годоскопа H1 и H2, расположенные на расстоянии 12 м друг от друга;
- спектрометр, состоящий из дрейфовых камер DC1 и DC2, удаленных на расстояние 4.6 м друг от друга и установленных до магнита, спектрометрического магнита (magnet) длиной 4 м с полем около 15 кГс и двух дрейфовых камер DC3 и DC4, установленных после магнита, расстояние между которыми составило 6 м.

Второе плечо спектрометрического тракта, состоящее из камер DC3 и DC4, было повернуто на угол около 52 мрад относительно оси пучка. Для измерения импульсного разброса пучка использовались только дрейфовые камеры. Пучковые годоскопы на основе оптических волокон создаются для нового поляризационного эксперимента [7],[8] на канале 14. В данном эксперименте они использовались для независимой калибровки дрейфовых камер. Характеристики основных приборов приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Характеристики использовавшихся трековых детекторов

№ п/п	Детектор	Тип детектора	Станции	Расстояние от центра магнита, мм	Шаг, мм	Число каналов в плоскости	Размер детектора, мм <sup>2</sup>
1	H1	Волоконный годоскоп	X, Y	-21287	0,88	16	14×130 <sup>1</sup>
2	H2	Волоконный годоскоп	X, Y	-8587	0,88	16	14×130
3	DC1	Дрейфовая камера	X, Y	-8060	12,0	16	192×192
4	DC2	Дрейфовая камера	X	-3440	12,0	16	192×192
5	DC3	Дрейфовая камера	X	+3100	12,0	16	192×192
6	DC4	Дрейфовая камера	X, Y	+9100	12,0	16	192×192

Для регистрации угла вылета и определения импульса частиц использовался спектрометр на основе дрейфовых камер. Каждая координатная станция камер (Рис. 2) имела две плоскости, сдвинутые друг относительно друга на 12 мм. Всего использовалось 96 каналов дрейфовых камер. Подробное описание камер и результаты исследования их параметров приведены в работе [6].

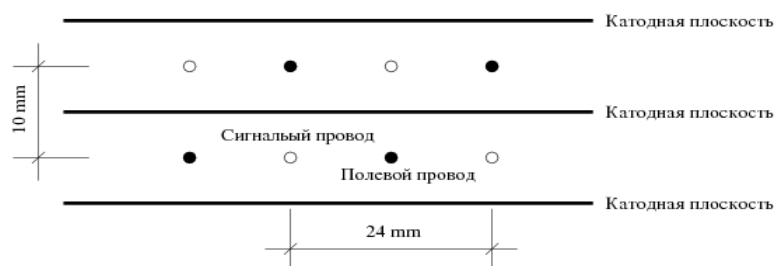


Рис. 2. Структура дрейфовой станции.

<sup>1</sup> Размер чувствительной области для каждой связки волокон.

На Рис. 3 приведена зависимость времени дрейфа от координаты. Координатное разрешение дрейфовых камер ожидалось не хуже 0.16 мм, а эффективность вне зоны нечувствительности была 90% (Рис. 4). Эффективность каждой станции составила 75%, прежде всего из-за зон неэффективности около полевых проволок.

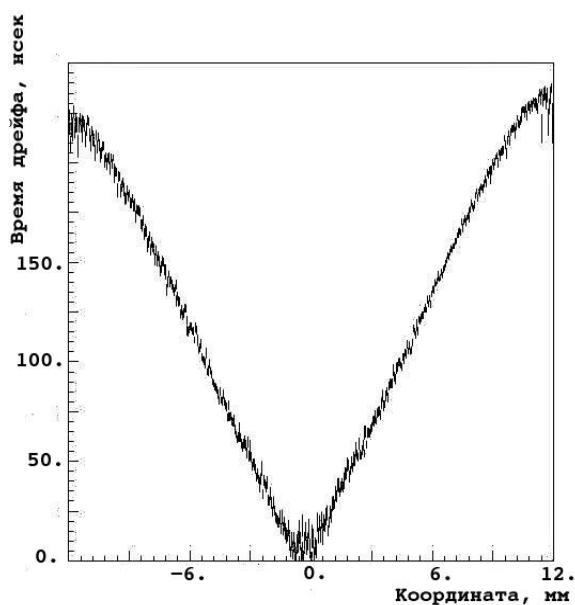


Рис. 3. Зависимость времени дрейфа от координаты в дрейфовых промежутках.

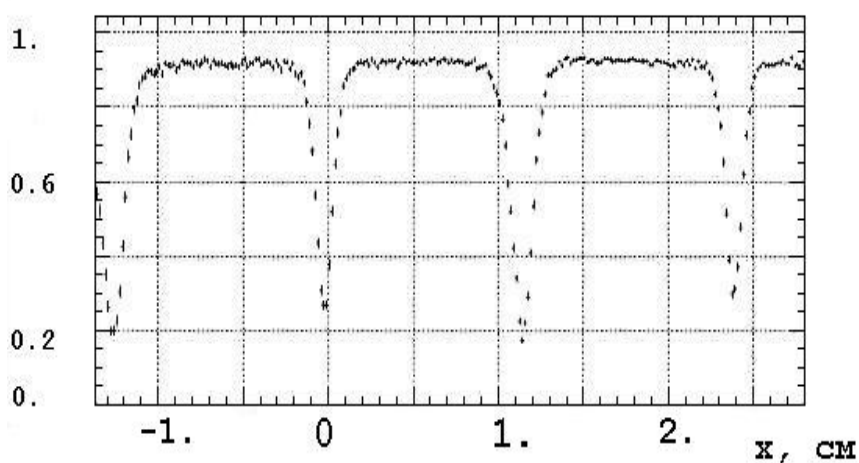


Рис. 4. Зависимость эффективности дрейфовой камеры от координаты.

Процедура независимой калибровки (геометрической привязки) дрейфовых камер проводилась при помощи двух двухкоординатных годоскопов, созданных на основе оптических волокон аналогично детекторам эксперимента COMPASS (CERN) [9].

Сцинтилляционные волокна SCSF-38 фирмы Kugaгау диаметром 0.5 мм образуют 32 колонки с шагом 0.44 мм, как показано на Рис. 5. Каждая колонка имеет пять волокон в направлении движения частиц. Соседние колонки слегка перекрываются, что позволяет устранить «мёртвые» зоны из-за наличия нечувствительных оболочек волокон и повысить эффективность регистрации. Белая водно-дисперсионная краска, используемая для фиксации волокон в кассете, ограничивает распространение сцинтилляционного света в поперечном направлении. Свет с двух соседних колонок волокон регистрируется одним фотоэлектронным умножителем ФЭУ-84/3. Сигнал с фотодетектора через дискриминатор с э.с.л.-выходом направляется на время-цифровой преобразователь (ВЦП). Чувствительная область каждой связки волокон составляет  $14 \times 130$  мм<sup>2</sup>. Рабочая область годоскопа, т.е. область, где перекрываются рабочие области горизонтальной и вертикальной связок волокон, составляет  $14 \times 14$  мм<sup>2</sup>. Эффективность работы годоскопов 96%. Разрешение детектора  $\sigma_{x,y} = 0.88 / \sqrt{12} = 0.254$  мм.

Для выработки триггерного сигнала установки необходимо одновременное срабатывание сцинтилляционных счетчиков S1, S2, S3 диаметром 10 см каждый.

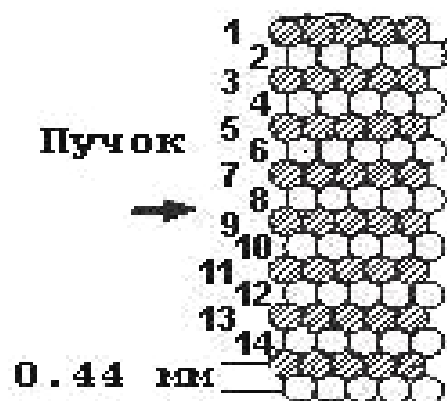


Рис. 5. Схема (поперечный разрез) одной связки волоконного годоскопа.

Архитектура системы сбора данных описываемой установки проста (Рис. 6), так как для регистрации данных с камер и годоскопов использовалась однородная электроника. Для получения трековой информации сигналы с дрейфовых камер и годоскопов формировались и преобразовывались в стандарт э.с.л. усилителями-формирователями. Использовались усилители-формирователи УПД-16 производства ИФВЭ с порогом регистрации 3 мкА для камер и 20 мкА для волоконного годоскопа. Ширина формирования выходного сигнала УПД16 составляла 150 нс. Сигналы с трековой системы регистрировались с помощью ВЦП LeCroy TDC 3377 в стандарте КАМАК и использовались для определения факта и времени срабатывания каждого канала. Информация о времени срабатывания волоконного годоскопа использовалась только для отбора событий, при этом ширина окна для полезных событий с волоконного годоскопа составляла 30 нс. Точность регистрации времени срабатывания составляла 1 нс в диапазоне 1 мкс. ВЦП использовались в режиме COMMON STOP, когда измеряется время от момента регистрации сигнала с детектора до момента прихода триггера, задержанного на известное время. Если в течение 1 мкс до прихода задержанного триггера канал срабатывает несколько раз, регистрируются все (но не более 16) срабатывания.

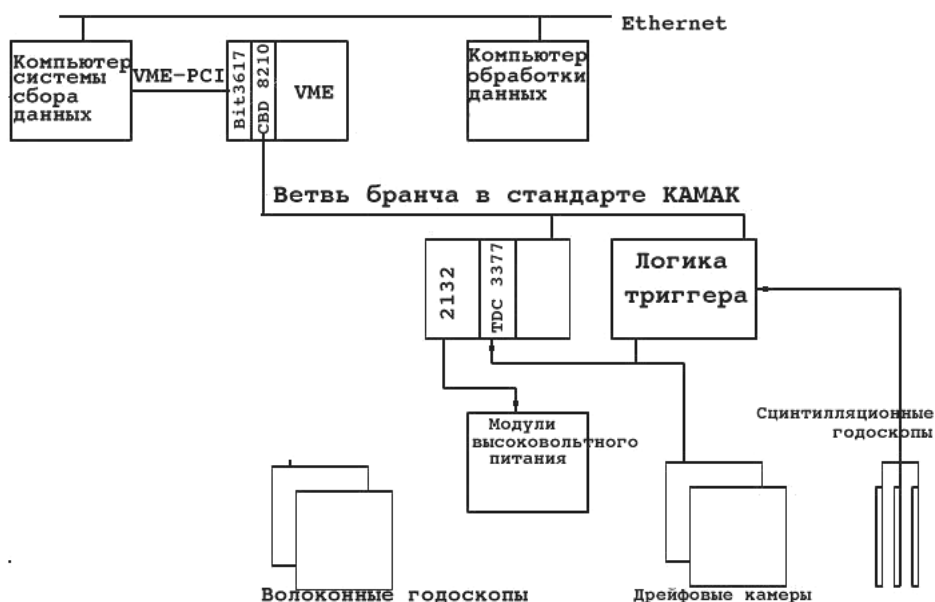


Рис. 6. Принципиальная схема системы сбора данных.



Программирование заданных режимов ВЦП и чтение поступающей из модулей информации осуществлялось по параллельной ветви КАМАК через драйвер ветви в стандарте VME (CES CBD8210). Связь с компьютером системы сбора данных выполнялась через мост PCI-VME ВІТЗ, который также транслировал в компьютер прерывания из VME-модуля для синхронизации процессов системы сбора данных с работой У-70.

Для восстановления трека частицы первоначально необходимо определить зависимость координаты частицы от времени в дрейфовой камере. Также надо подобрать правильную задержку для каждой проволоочки (с точностью до общей постоянной) и определить зависимость скорости дрейфа от расстояния для каждой станции. В идеальном (но не нашем) случае эта зависимость линейна.

Мы выбрали способ, при котором координата в каждой плоскости определялась через разность времен  $\Delta t$  двух соседних сработавших в разных плоскостях проволоочек. При таком подходе нулевая координата соответствует центру промежутка между проволоочками ( $\Delta t=0$ ). Выбор такого алгоритма обусловлен тем, что при квадратичной зависимости от времени дрейфа пути пролета частицы от проволоочки зависимость разности времени от координаты будет линейна. Для восстановления координаты мы использовали функцию  $x_{rec}=c_0+c_1\cdot\Delta t+c_2\cdot(\Delta t)^3$ , так как зависимость должна быть нечетной функцией относительно разности времен. Здесь  $c_0$  определяет удаление центра данного дрейфового промежутка от оси пучка,  $c_1$  – скорость дрейфа, а коэффициент  $c_2$  учитывает непостоянство этой скорости в ячейке из-за неоднородности поля.

Так как ширина протонного пучка и размер волоконного годоскопа практически совпадали с шириной одного дрейфового промежутка, то для калибровки использовались данные только одного промежутка в каждой станции. Перед проведением измерений камеры были установлены на пучке так, чтобы в исследуемые дрейфовые промежутки всех камер попадало более 70% всей статистики. Для калибровки использовались только данные с подавлением шума, а именно:

- для каждой станции камер профильная зависимость суммы времен с двух проволоочек от их разности фитировалась квадратичной функцией и отбирались только

те события, для которых сумма времен отличалась от значения данной функции не более чем на 10% (Рис. 7);

- для отобранного ансамбля событий строилась зависимость разности времен в дрейфовой камере от координаты в волоконном годоскопе (Рис. 8); чтобы уменьшить зависимость влияния шума в камерах на параметры фитирующей функции, отбирались только те события, для которых разность времен отличалась от среднего значения не больше, чем на 50 нс.

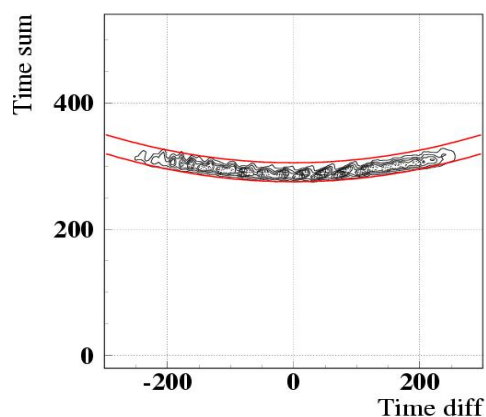


Рис. 7. Зависимость суммы времен от их разности. Линиями показаны границы используемого интервала данных.

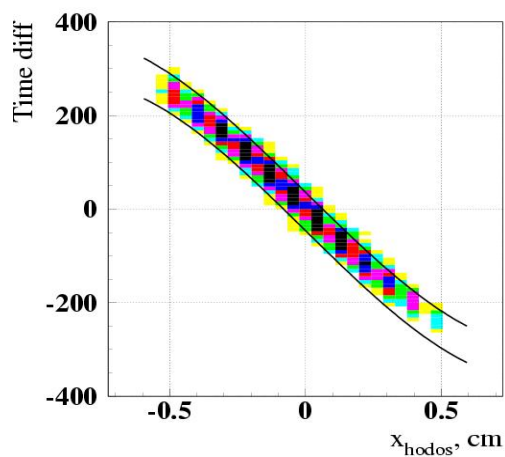


Рис. 8. Зависимость разности времен от координаты. Линиями показаны границы используемого интервала.

Таблица. 2. Характеристики камер, необходимые для восстановления трека

Дрейфовые камеры	Коэффициент при $x$	Коэффициент при $x^3$	$\sigma(x_{track} - x_{DCn})$	Оценка разрешения камеры
DC1 (X)	0.176e-02	0.306e-08	0.28 мм	0.13 мм
DC2 (X)	0.164e-02	0.235e-08	0.22 мм	0.13 мм
DC3 (X)	0.169e-02	0.193e-08	0.23 мм	0.13 мм
DC4 (X)	0.130e-02	0.228e-08	0.40 мм	0.13 мм

Примечание.  $x_{track}$  – координата восстановленного трека для соответствующей камеры по данным волоконных годоскопов и всех камер выше по пучку;  $x_{DCn}$  – восстановленная из времени координата для камеры  $n$ .

Накопленная профильная гистограмма фитировалась выбранной функцией. Результаты фита для всех  $X$  плоскостей приведены в Табл. 2. Во втором и третьем столбцах приведены значения коэффициентов используемой функции, в четвертом – значение разности между координатами, восстановленными в соответствующей камере и из трека. На Рис. 9 показана зависимость восстановленной координаты в камере DC1 от координаты в волоконном годоскопе. На Рис. 10 приведено распределение событий по разности координат, восстановленных независимо в двух детекторах. Из этих данных можно оценить собственно разрешение первой дрейфовой камеры:

$\sigma_{DC} = \sqrt{\sigma_{hist}^2 - \sigma_{H2}^2} \approx 0.130$  мм, где  $\sigma_{hist}$  – ширина распределения в данной гистограмме, а  $\sigma_{H2}=0.254$  мм – разрешение волоконного годоскопа.

Координатное разрешение первой камеры определялось с учетом разрешения волоконных годоскопов, как описано выше. Для второй и третьей камер разрешение предполагалось 0.130 мм. В случае четвертой камеры большее по сравнению с другими камерами стандартное отклонение разности между восстановленной координатой и координатой трека  $\sigma(x_{track} - x_{DC4})$  объясняется разбросом координаты частицы в дрейфовой камере из-за импульсного разброса пучка. Нелинейность вследствие неоднородности поля в ячейке компенсируется за счёт использования кубической функции и, даже на краях камеры, не превышает нескольких процентов.

Важным способом независимой оценки разрешения камер является определение разности координат в центре магнита, полученных из треков до ( $x_{track1}$ ) и после ( $x_{track2}$ ) спектрометрического магнита, т.е. разность в «сшивке» двух треков.

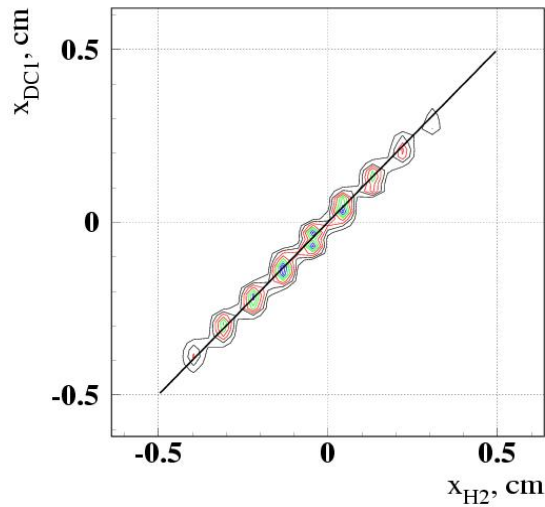


Рис. 9. Зависимость координаты в DC1 относительно координаты в H2. Прямая линия соответствует функции  $y=x$ .

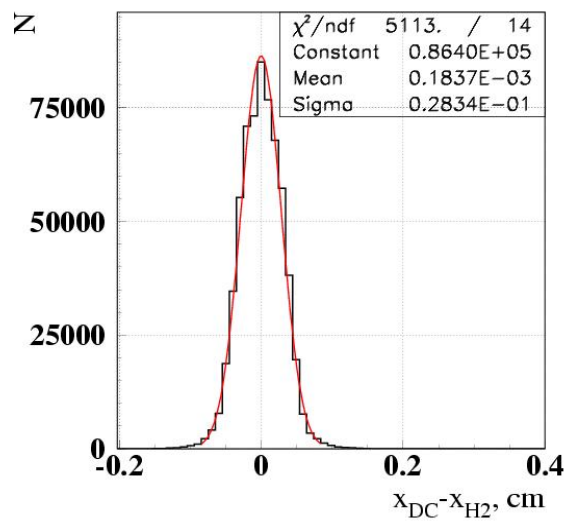


Рис. 10. Распределение событий по разности координат, восстановленных в камерах DC и годоскопе H2.

Результат такой сшивки приведен на Рис. 11. Если предположить, что разрешение всех камер одинаково (что подтверждается другими исследованиями), то ширина распределения в центре магнита  $\sigma_x(x_{track1}-x_{track2})=0.33$  мм достигается при разрешении в каждой камере  $\sigma_x(DC)=0.135$  мм. Если при обработке не проводить отбор событий

в камерах по времени, то ширина распределения будет равна  $\sigma_x(x_{track1}-x_{track2})=0.36$  мм, что соответствует разрешению камер  $\sigma_x(DC)=0.14$  мм.

Разрешение камер в данном сеансе несколько лучше результатов, приведённых в [6], так как пучок, в основном, проходил по центру дрейфового промежутка. При исследовании характеристик пучка использовались все каналы (дрейфовые промежутки) камер. При этом сохранялась линейность восстановления координаты.

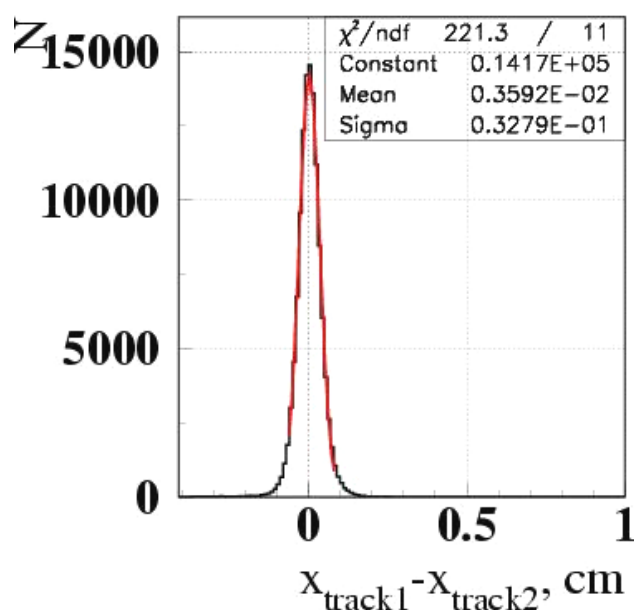


Рис. 11. Точность определения x-координаты точки «сшивки» в центре магнита двух треков track1 и track2 до и после магнита соответственно.

### Характеристики протонного пучка

При проведении исследований использовался протонный пучок, выведенный из кольца У-70 с помощью монокристалла, изогнутого на угол около 80 мрад.

В нашем случае основная трудность заключалась в том, что из-за высоких требований к разрешению спектрометра по импульсу необходимо было получить пучок низкой интенсивности, который не диагностируется системами вывода У-70. Процедура состояла в следующем:

- организация вывода пучка большой интенсивности (до  $10^7$  протонов/цикл);
- определение размера и положения выведенного пучка с помощью волоконных годоскопов;
- снижение интенсивности пучка (путем уменьшения наведения на кристалл практически «втемную») и проверка измеренных параметров пучка волоконными годоскопами.

Предыдущий опыт работы с протонным пучком показал, что можно ожидать получение пучка, размер которого на мишени составит  $\sim 2.7\text{--}3.5$  мм при угловой расходимости  $< 1$  мрад. В нашем случае размер пучка в области мишени (на волоконном годоскопе Н2) составил  $\sigma_x = 6.3$  мм (Рис. 12). Следует, однако, отметить, что при проведении измерений оптимизации размера (наведения) пучка при какой-то конкретной координате не проводилось, и размер пучка на годоскопе Н1 оказался меньше  $\sigma_x = 4.5$  мм. При оптимизации вывода можно получить пучок, размер которого на мишени будет  $\sim 3\text{--}4$  мм, как и в проведенных измерениях односпиновой асимметрии на канале 14. Подтверждением возможности получения узкого пучка в зоне мишени является малая угловая расходимость пучка  $\sigma_\alpha = 0.12$  мрад для отобранных событий.

Для определения импульсного разрешения пучка была проведена точная привязка угла поворота пучка в магните при условии, что средний импульс пучка строго равен 50 ГэВ. Результаты привязки приведены на Рис. 13. Данная гистограмма может быть также использована для оценки импульсного разрешения пучка. Импульсный разброс  $\sigma(P)/P$  падающего на мишень пучка протонов, выведенного из кольца У-70 с помощью монокристалла кремния, размещенного в вакуумной камере ускорителя, ожидался на уровне  $(0.5\text{--}1) \cdot 10^{-3}$ , как в кольце У-70.

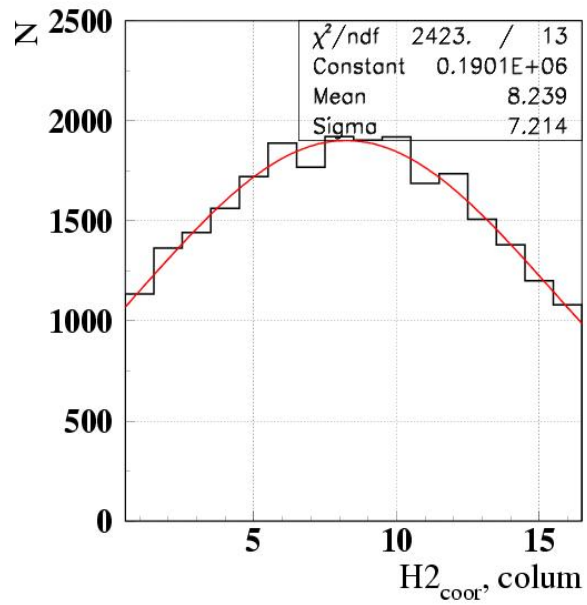


Рис. 12. Горизонтальный профиль пучка на годоскопе H2 в каналах волоконного годоскопа.

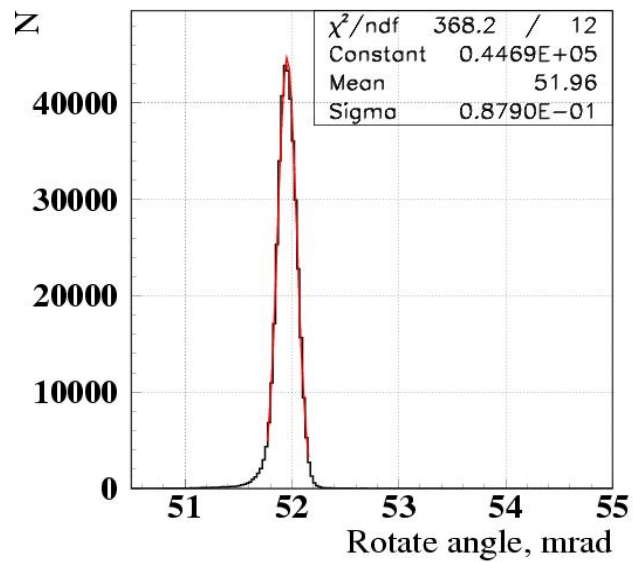


Рис. 13. Распределение событий по углу поворота частиц в магнитном спектрометре.

Измерение импульсного разрешения пучка было одной из главных задач сеанса. На Рис. 14 приведен импульсный спектр пучка протонов, ширина которого  $\sigma(P)/P=0.17\%$ . Дрейфовые камеры с координатным разрешением 0.135 мм определяют разрешение трековой системы по импульсу с точностью 0.1%. Таким образом, собственно импульсный разброс пучка составляет 0.13%.

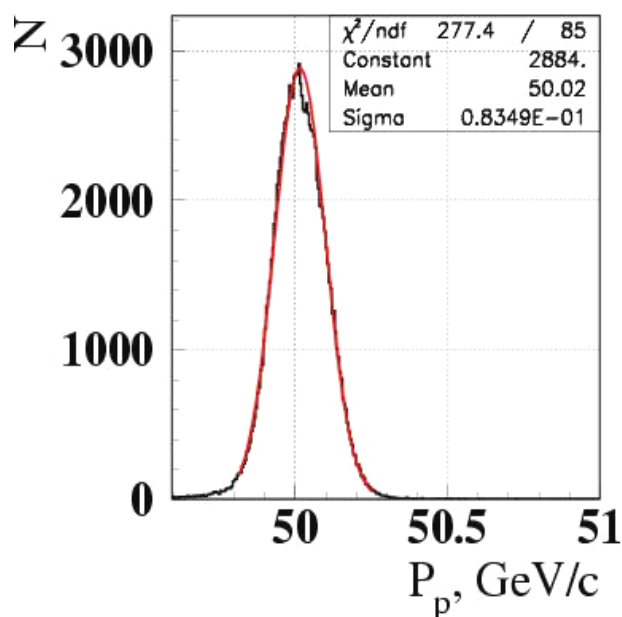


Рис. 14. Импульсный спектр протонов.

Оценить импульсный разброс пучка можно также по ширине разности координат камеры и трека в DC4 (Рис. 11). Без учета импульсного разброса пучка разрешение в DC4 должно соответствовать разрешению других камер, т.е. быть на уровне 0.22 мм. Основной вклад в разрешение даёт импульсный разброс пучка ( $\sigma_x = \sqrt{0.40^2 - 0.22^2} = 0.34$  мм), что определяет вклад порядка 0.12% в ширину углового (и импульсного) разрешения при расстоянии между DC3 и DC4 6 м и угле поворота 51.96 мрад пучка протонов с импульсом 50 ГэВ.



Для оценки фона использовались те же данные, что и при анализе импульсного разброса пучка. Даже считая, что в интервале энергий 48–49 ГэВ нет вклада от многократного рассеяния протонов на веществе камер и все определяется фоновыми частицами, отношение фоновых событий к общему числу частиц в диапазоне импульсов 49.8–50.2 ГэВ не превышает 0.026%.

Так как по условиям измерений (для получения пучка низкой интенсивности) отбирались только протоны, находящиеся на наибольшем удалении от равновесной орбиты, где импульсный разброс частиц максимален, при проведении исследований с пучком большой интенсивности (до  $10^7$  протонов/цикл) импульсный разброс пучка будет меньше. Таким образом, данный пучок образуется именно благодаря эффекту каналирования, поскольку импульсный разброс пучка совпадает с расчетной величиной импульсного разброса пучка внутри вакуумной камеры ускорителя.

## **Заключение**

Впервые проведены подробные измерения параметров протонного пучка с импульсом 50 ГэВ/с, выведенного из ускорителя У-70 ИФВЭ. При угле изгиба монокристалла кремния 80 мрад и оптимизации параметров канала транспортировки пучка достигнуты на мишени эксперимента следующие параметры: интенсивность  $10^7$  протонов/с ( $10^{12}$  протонов/с на кристалле); размеры пучка (среднеквадратичные) по горизонтали и вертикали 5 мм, угловые расходимости  $<0.5$  мрад. Впервые с применением спектрометра с высоким разрешением удалось измерить импульсный разброс пучка –  $\Delta p/p = \pm 0,1\%$ . Примесь фоновых частиц в протонном пучке оказалась менее 0.03%.

Пучок протонов в канале 2Б/14 полностью удовлетворяет требованиям эксперимента по измерению односпиновой асимметрии инклюзивного рождения мезонов при рассеянии протонов на поляризованной протонной мишени и не требует дополнительного измерения импульса и идентификации.

Коллектив авторов благодарит сотрудников ОУ-70 за стабильную работу ускорителя, обеспечившую проведение прецизионных измерений. Мы благодарны профессору С.Б. Нурушеву за полезные замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 09-02-00198 и 08-02-90455-Укр\_а.

### **Список литературы**

- [1] А.А. Асеев и др, Препринт ИФВЭ 89-57. – Серпухов, 1989.
- [2] А.А. Aseev et al. // Nucl. Instrum. Meth., A309:1-4, 1991.
- [3] В.Д. Апокин и др.//ПТЭ, 1998, № 4, 23-30 [Instrum.Exp.Tech.41:464-471,1998 (No.4)].
- [4] А.П. Бугорский и др.// ПТЭ, №1 (2001) [Instrum.Exp.Tech.44:1-11,2001].
- [5] V.A. Batarin et al.//Nucl. Instrum. Meth., A510:248-261, 2003.
- [6] V.A. Batarin et al.// Nucl. Instrum. Meth., A510:211-218, 2003.
- [7] V. Abramov et al. \*DSPIN-05, p. 449.
- [8] V.Mochalov et al.//Czech. J. Phys., 56:F151-F168, 2006.
- [9] S. Horikawa et al.// Nucl. Instrum. Meth., A516:34-49, 2004.

*Рукопись поступила 25 декабря 2009 г.*

В.В. Мочалов и др.

Измерение импульсного разброса протонного пучка, выведенного из ускорителя У-70 методом каналирования.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати 13.01.2010. Формат 60 × 84/16.      Офсетная печать.  
Печ. л. 1,125. Уч.- изд. л. 1,73. Тираж 80. Заказ 26.      Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

П Р Е П Р И Н Т 2009-22, ИФВЭ, 2009

---