

На правах рукописи

КОСЬЯНЕНКО Сергей Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 400 ГЭВ  
ИЗОГНУТЫМ МОНОКРИСТАЛЛОМ КРЕМНИЯ С ПОМОЩЬЮ  
ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПОЗИЦИОННО  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Гатчина

2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор  
Нестеров Михаил Мефодьевич,

кандидат физ.-мат. наук, доцент  
Сомов Сергей Всеволодович.

Ведущая организация:

Физический факультет Санкт-Петербургского государственного  
университета.

Защита состоится «\_\_\_» апреля 2010 г. в «\_\_\_» часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.034.01 при Учреждении Российской  
академии наук Институте аналитического приборостроения РАН (ИАП  
РАН) по адресу: 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАП РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.П. Щербаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Эффект объёмного отражения был теоретически предсказан в компьютерном моделировании прохождения протонов через кристаллическую решетку. Первое наблюдение эффекта выполнено с помощью фотоэмульсии, в которой был зарегистрирован протонный пучок, прошедший кристалл. Однако в такой постановке не было данных о падающем на кристалл пучке, да и сам снимок прошедшего фотоэмульсию пучка исключал не только детальное количественное изучение эффекта в силу свойств фотоэмульсии (нелинейность отклика, трудности оценки интенсивностей зарегистрированных пучков...), но и усложнял качественный анализ из-за трудности в интерпретации снимка. На повестке дня стояла задача качественного наблюдения явления объёмного отражения, с использованием современного электронного детектирующего оборудования, и его количественного исследования.

Эффект объёмного отражения, как новая мода взаимодействия частиц с кристаллической структурой, кроме научной значимости имеет и практическое значение, связанное с появлением новых возможностей управления пучками частиц. В перспективе это имеет особое значение, например, при создании ЛНС ввиду огромных затрат при его разработке и экстремальности его параметров.

### Цели настоящей работы

1. Обнаружить явление объёмного отражения протонов с энергией 400 ГэВ изогнутыми монокристаллами кремния. Оценить эффективность и угол объёмного отражения.
2. Зарегистрировать объёмное отражение протонов с энергией 400 ГэВ, прошедших сборку из изогнутых монокристаллов кремния. Оценить эффективность и угол такого процесса.
3. Разработать и апробировать позиционно чувствительный детектор (ПЧД) для исследования явления объёмного отражения протонов.
4. Разработать систему сбора, передачи, обработки и представления экспериментальных данных, поступающих с ПЧД.

Научная новизна работы состоит в первом наблюдении эффекта отражения ультрарелятивистских протонов и получении количественных характеристик этого явления, а также в разработке, создании и исследовании плоскопараллельного позиционно чувствительного детектора (3-ПЧД), обладающего пространственным разрешением на уровне десятков микрон.

Практическая значимость работы состоит в том, что явление объёмного отражения протонов монокристаллом позволит в будущем создавать более эффективные и дешевые системы формирования и вывода

протонных пучков.

Разработанный и созданный детектор может быть с успехом применен не только в физике высоких энергий, но и в прикладных областях, таких как медицина, биология, дефектоскопия и др.

#### Апробация работы

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на конференции «Channeling 2006, Frascati, Italy, июнь 2006 г.», на сессии ОФН РАН «Секция ядерной физики ОФН РАН, ноябрь 2007», а также на семинарах ПИЯФ им. Б. П. Константинова.

#### Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ.

#### Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации 102 страницы, 60 рисунков и 26 таблиц.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлены краткие исторические сведения, мотивация, актуальность, цель работы и вклад автора.

**Первая глава** посвящена обзору процессов каналирования и объёмного отражения протонов. В конце главы сформированы пункты, которые необходимо исполнить для успешного выполнения работы.

**Вторая глава** посвящена эксперименту по исследованию отражения протонов монокристаллом кремния. В первом параграфе этой главы описана экспериментальная установка и приведены характеристики изогнутых кристаллов кремния QM1 и QM2, с помощью которых изучалось исследуемое явление.

Кристалл QM1.

1. Толщина 930 мкм.
2. Изгиб плоскости каналирования (111) (наведённая квазимозаика), измеренный с помощью рентгеновских лучей, равен 75 мкрад.
3. Радиус изгиба плоскости (111)  
равен  $R = \frac{930 \text{ мкм}}{75 \text{ мкрад}} = 12,4 \text{ м}$ .
4. Критический угол каналирования равен 8,4 мкрад.
5. Расчётная толщина области отражения равна 100 мкм.
6. Угол МКР 2,8 мкрад.
7. Ожидаемое расстояние между прямым (неориентированное положение кристалла) и каналированным пучком на базе 71,4 м равно  $75 \times 10^{-6} \text{ рад} \times 71,4 \text{ м} \approx 5,4 \times 10^{-3} \text{ м} = 5,4 \text{ мм}$ .
8. Ожидаемое расстояние между прямым пучком и отражённым

равно  $2 \times 8,4 \times 10^{-6} \text{ рад} \times 71,4 \text{ м} \approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ м} = 1,2 \text{ мм}$ .

Кристалл QM2.

1. Толщина 840 мкм.
2. Изгиб плоскости каналирования (111) (наведённая квазимозаика), измеренный с помощью рентгеновских лучей, равен 72 мкрад.
3. Радиус изгиба плоскости (111) равен  $R = \frac{840 \text{ мкм}}{72 \text{ мкрад}} = 11,67 \text{ м}$ .
4. Критический угол каналирования равен 8,4 мкрад.
5. Расчётная толщина области отражения равна 98 мкм.
6. Угол МКР 2,6 мкрад.
7. Ожидаемое расстояние между прямым (неориентированное положение кристалла) и каналированным пучком на базе 71,4 м равно  $72 \times 10^{-6} \text{ рад} \times 71,4 \text{ м} \approx 5,1 \times 10^{-3} \text{ м} = 5,1 \text{ мм}$ .
8. Ожидаемое расстояние между прямым пучком и отражённым равно  $2 \times 8,4 \times 10^{-6} \text{ рад} \times 71,4 \text{ м} \approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ м} = 1,2 \text{ мм}$ .

На рис.1 приведена схема экспериментальной установки.

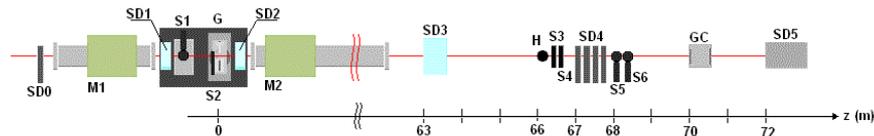


Рис. 1. Расположение экспериментального оборудования на пучке протонов канала H8 ускорителя SPS CERN

G – Гониометр для поворота исследуемых кристаллов, SD0...5 – кремневые стриповые детекторы, S1...6 – сцинтилляционные счётчики, H – сцинтилляционный годоскоп.

Все результаты, представленные в данной работе, получены посредством плоскопараллельного позиционно чувствительного детектора (3-ПЧД) (GC). Для поворота кристалла использовался гониометр (G) с угловым разрешением порядка 1 мкрад. Магниты M1 и M2 являлись частью протонного канала и не выполняли в эксперименте особых функций.

Во втором параграфе первой главы описана система измерения и съёма информации на базе плоскопараллельного позиционно чувствительного детектора (см. рис. 2).

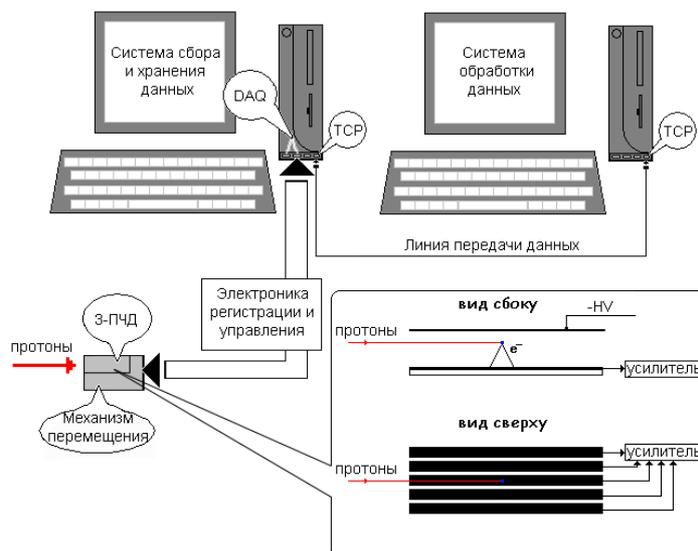


Рис. 2. Система измерения, сбора и обработки информации на базе 3-ПЧД

Сигналы от протонов, зарегистрированных в 3-ПЧД, записываются в компьютер через плату сбора данных (DAQ).

Данные, записанные и хранящиеся в «системе сбора и хранения данных», по требованию или в автономном режиме передаются в «систему обработки данных», где происходит анализ полученной информации с помощью специализированного программного обеспечения. Передача информации между «системой сбора и хранения данных» и «системой обработки данных» осуществляется по протоколу TCP. Время между записью и обработкой данных не превышает нескольких секунд, что позволяет в режиме реального времени следить за ходом эксперимента. Схематический вид детектора, в двух проекциях, изображён на рис. 2 в правом нижнем углу.

Пространственное разрешение 3-ПЧД вдоль горизонтальной координаты задаётся на стадии разработки. В данной экспериментальной установке оно составляет 200 мкм. Вертикальное разрешение задаётся «механизмом перемещения», и в нашем случае оно составляет 200 мкм.

В третьем параграфе приведены результаты эксперимента по исследованию объёмного отражения протонов с энергией 400 ГэВ.

На рис. 3 приведено распределение интенсивности протонов, прошедших кристалл QM1. Ось X отвечает за распределение пучка в 3-ПЧД, ось Y – за угловую ориентацию кристалла относительно падающего на него пучка. Кристалл поворачивался гониометром G (см. рис.1).

При нулевой ориентации кристалла (0 мкрад, ось Y) центр пучка находится на позиции ~ 9,2 мм по оси X (неориентированный кристалл). При увеличении угла поворота гониометра часть протонов переходит в режим каналирования, чему соответствует распределение интенсивности с центром в точке ~ 3,6 мм и угловым положением кристалла 69,84 мкрад (каналирование). При дальнейшем увеличении угла гониометра появляется отражённая компонента, и при угле 130,95 мкрад центр тяжести пучка смещается на позицию ~ 9,8 мм (объёмное отражение), где происходит почти полный переход прямого пучка в отражённый.

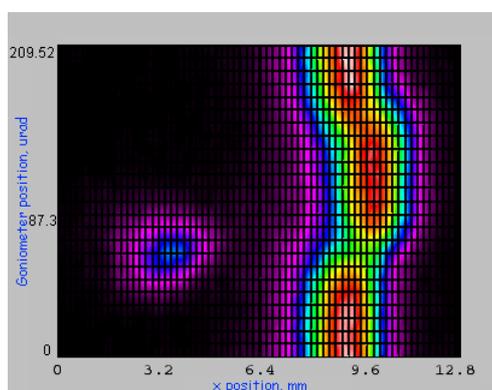


Рис. 3. Распределение интенсивности протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с, прошедшего через кристалл QM1. Ось X соответствует позиции пучка в 3-ПЧД, ось Y соответствует угловому положению гониометра

Из данных, представленных на рис. 3, выбирались те угловые положения кристалла, при которых эффекты каналирования и отражения максимальны. Для оценки вероятности этих процессов отобранные профили аппроксимировались функциями Гаусса (1) (максимум трёх):

$$f_k = \frac{sum_k}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{(j-m_k)^2}{2\sigma_k^2}\right), \quad (1)$$

$$g = \sum_{k=0}^2 f_k + b,$$

$j$  – номер канала в гистограмме,  $sum_k$  – накопленная статистика под функцией  $f_k$ ,  $m_k$  – математическое ожидание,  $\sigma_k$  – стандартное отклонение,  $b$  – равномерный фон.

Результаты вычислений для кристалла QM1 суммированы в таблице 1.

Таблица 1

Эффективность каналирования	46 %
Угол каналирования	77 мкрад
Эффективность отражения	$98,1 \pm 0,61\%$
Угол отражения	$11,9 \pm 0,52$ мкрад
Эффективность объёмного захвата	$2 \pm 0,4$ %

На рис. 4 приведено распределение интенсивности протонов, прошедших кристалл QM2. Изгиб внутренних плоскостей (111) кристалла QM2 имеет противоположную ориентацию в сравнении с кристаллом QM1.

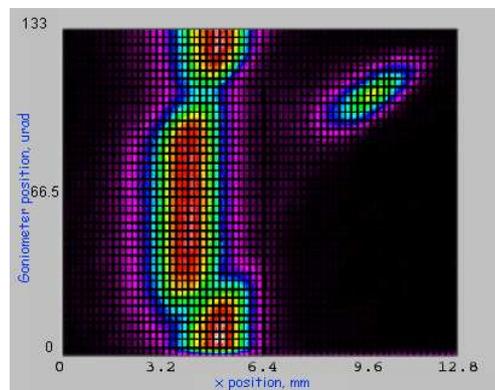


Рис. 4. Распределение интенсивности протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с, прошедшего через кристалл QM2. Ось X соответствует позиции пучка в 3-ПЧД, ось Y соответствует угловому положению гониометра

Двухмерные профили для трёх основных положений кристалла приведены на рис. 5.

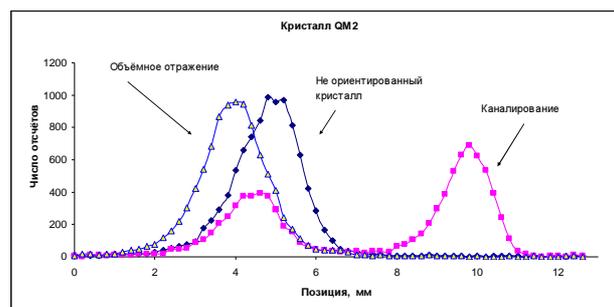


Рис. 5. Двухмерные профили протонного пучка для трёх основных положений кристалла QM2

На рис 6 приведена зависимость стандартного отклонения и математического ожидания (центра тяжести) профиля пучка от углового положений кристалла. На нём можно выделить следующие области.

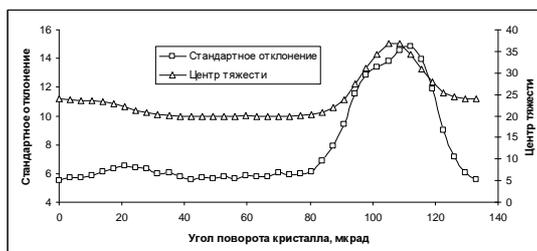


Рис. 6. Зависимость стандартного отклонения и математического ожидания профиля протонного пучка в зависимости от углового положения кристалла QM2.

- Первая область, по два измерения на концах (0-3,5; 129,5-133) мкрад, где пучок можно считать неизменённым.
- Вторая область, интервал (7-35) мкрад, где параметры  $\bar{x}$  и  $D$  меняются медленно.
- Третья область (38,5-77) мкрад, где параметры пучка можно считать постоянными.
- Четвертая область, (80,5-126) мкрад, быстрого изменения параметров  $\bar{x}$  и  $D$ .

Наличие первой области связано с тем, что согласно критерию Смирнова выборки 0; 3,5; 129,5; 133 мкрад, на уровне значимости 5 %, неразличимы. Третья область, на уровне значимости 5 %, тоже неразличима. Пользуясь критерием Смирнова, проверили однородность выборок первой и третьей областей и установили, что на уровне значимости 1 % они неразличимы. Таким образом, пользуясь безмодельным подходом, можно заключить, что вероятность отражения близка к 100 %. Классический анализ профилей с аппроксимацией их суммой функций Гаусса даёт меньший результат, что связано с неидеальным соответствием реальных распределений распределению Гаусса.

Результаты вычислений для кристалла QM2 суммированы в таблице 2.

Таблица 2

Пограничный интервал отражения	35-7=28 мкрад
Угловой интервал отражения	105-21=84 мкрад
Угловой интервал эффективного отражения	77-38,5=38,5 мкрад

Таблица 2 (продолжение)

Угловой интервал каналирования	122-92=30 мкрад
Эффективность каналирования (Гаусс)	52 %
Угол каналирования	70 мкрад
Эффективность отражения (Гаусс)	97,9 ± 0,67 %
Угол отражения	12 ± 0,58 мкрад
Эффективность объёмного захвата	2 ± 0,4 %

На рис. 7 приведено распределение интенсивности протонного пучка, прошедшего два кристалла QM1+QM2, ориентированных по углу относительно друг друга неоптимальным образом. На нём явно присутствуют ориентационные эффекты от двух кристаллов, два каналирования и два отражения.

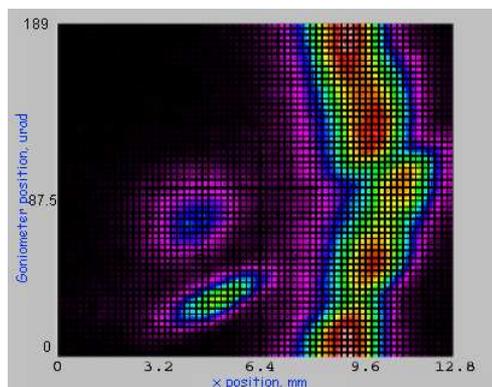


Рис. 7. Распределение интенсивности протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с, прошедшего через сборку кристаллов QM1+QM2, ориентированных неоптимальным образом. Ось X соответствует позиции пучка в 3-ПЧД, ось Y соответствует угловому

На рис. 8 приведено распределение интенсивности протонного пучка, прошедшего два кристалла QM1+QM2, оптимально ориентированных по углу для объёмного отражения как относительно друг друга, так и относительно пучка. Согласно такой геометрии угол, на который отразится пучок, прошедший два кристалла, должен совпадать с суммой углов объёмного отражения в отдельных кристаллах.

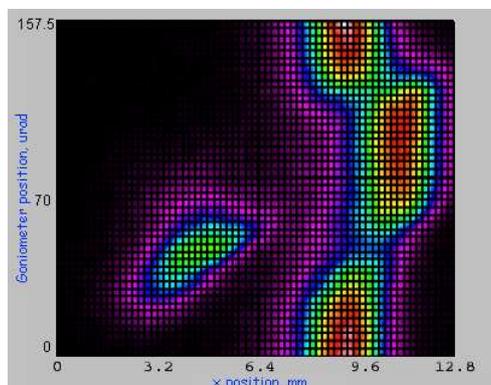


Рис. 8. Распределение интенсивности протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с, прошедшего через сборку кристаллов QM1+QM2, ориентированных оптимальным образом. Ось X соответствует позиции пучка в 3-ПЧД, ось Y соответствует угловому положению гониометра

После аппроксимации данных в соответствии с выражением (1) получены результаты, приведённые в таблице 3.

Таблица 3

Угловой интервал отражения	$\sim 100$ мкрад
Эффективность отражения	$96,6 \pm 0,71$ %
Угол отражения	$23,4 \pm 0,25$ мкрад
Эффективность объёмного захвата	$4 \pm 0,5$ %

Угол отражения протонов в двух кристаллах соответствует сумме углов отражений в каждом кристалле.

Так как результаты, представленные в диссертации, получены с помощью 3-ПЧД, а он является «новым» детектором, то вторая и третья главы посвящены описанию его принципа работы и характеристикам.

**В третьей главе** описывается принцип действия плоскопараллельной камеры (ППК), опыт работы с которой был накоплен в результате подготовки эксперимента «Фамилон». На основе ППК был разработан и создан 3-ПЧД с высоким пространственным разрешением, описание которого приведено в третьей главе.

Принцип действия ППК демонстрируется на рисунке 9.

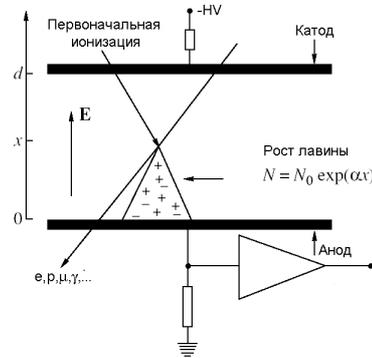


Рис. 9. Принцип работы ППК

Количество электронов, собранных на аноде, определяется выражением

$$n = n_0 e^{\alpha x}, \quad (2)$$

где  $n_0$  – количество первоначальных электронов на данном расстоянии  $x$  от анода и  $\alpha$  – первый коэффициент Таунсенда.

В табл. 4 приведены эффективности регистрации релятивистских электронов, позитронов и поверхностных мюонов с импульсом 27 МэВ/с плоскопараллельной камерой.

Таблица 4

Частица	Газовый зазор, см	Количество зазоров	Эффективность регистрации, %	Газ $\text{Ar}^x \text{CO}_2^{1-x}$ X, %
позитрон	0,1	1	66	0
электрон	0,1	1	66	0
позитрон	0,1	2	82	0
электрон	0,1	2	82	0
мюон	0,1	1	99	0
мюон	0,04	1	88,4	30
мюон	0,02	1	72,7	30
мюон	0,02	1	33	0

Временное разрешение ППК с газовым промежутком 1 мм меньше 1 нс.

**Четвёртая глава** посвящена плоскопараллельному позиционно чувствительному детектору, с помощью которого получены все результаты

по объёмному отражению протонов монокристаллом кремния, представленные в диссертации. Сам детектор использовался в физике высоких энергий впервые.

Плоскопараллельная камера, анод которой разделён на стрипы, становится плоскопараллельным позиционно чувствительным детектором (3-ПЧД). Катод детектора сделан из цельного кремния, стрипы (аноды) сделаны из никеля, напыленного на ситалловую подложку с микронной точностью. На рис. 10 приведена схема 3-ПЧД и принцип его работы.

В эксперименте 3-ПЧД устанавливался так, чтобы протоны в него влетали параллельно анодам (стрипам). В этом случае детектор регистрировал тонкий срез пучка, что позволяло иметь пространственное разрешение в двух плоскостях и после вертикального механического сканирования восстановить двухмерный профиль.

Та область, из которой лавина, начавшись, сможет достигнуть заряда, превышающего порог срабатывания усилителя, пусть даже с малой вероятностью, составляет примерно 300 мкм, начиная от катода для 3-ПЧД с зазором 600 мкм. Таким образом, формируется элементарная регистрирующая ячейка шириной, равной ширине стрипа, и высотой около 300 мкм. Сигналы, полученные со всех таких ячеек, характеризуют распределение интенсивности пучка в узком по толщине слое.

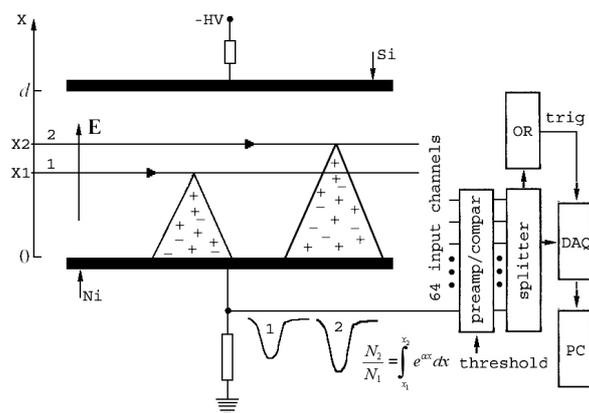


Рис. 10. Схема работы 3-ПЧД

На протонах ускорителя ПИЯФ проверялась стабильность отображения профиля пучка в зависимости от высокого напряжения, приложенного к детектору, интенсивности протонного пучка, а также однородность профиля в разных интервалах апертуры 3-ПЧД.

На рис. 11 представлен результат наблюдения явления отражения протонов изогнутыми атомными плоскостями (111) монокристалла

кремния на пучке протонов с энергией 1 ГэВ (Гатчина). Данный результат был получен в процессе апробации детектора на пучке протонов.

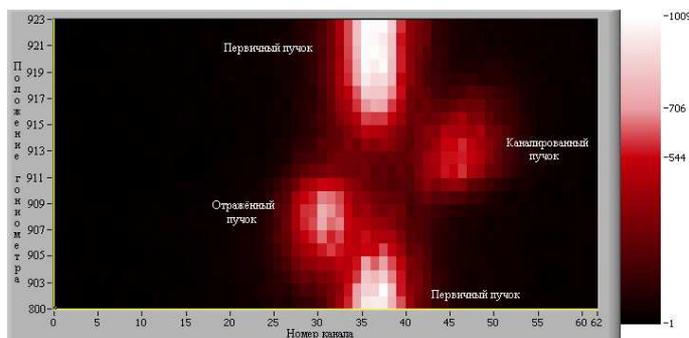


Рис. 11. Распределение интенсивности протонного пучка в 3-ПЧД в зависимости от угла поворота кристалла. Дискретность канала камеры (ось X) равна 0,2 мм. Дискретность поворота кристалла (ось Y) 62,5 мкрад. Расстояние от кристалла до камеры 5 м

**В пятой главе** описываются области возможного применения 3-ПЧД. Для иллюстрации работы 3-ПЧД с гамма-квантами до 20 кэВ сделано сканирование храпового механизма. При сканировании использовался 3-ПЧД с шагом стрипов 200 мкм, шаг вертикального сканирования составлял 200 мкм.

В этой главе также показано применение 3-ПЧД для мониторинга протонного пучка ускорителя ПИЯФ.

**В заключении** представлены результаты по обнаружению и исследованию объёмного отражения протонов изогнутыми монокристаллами кремния при помощи плоскопараллельного позиционно чувствительного детектора (3-ПЧД).

1. В эксперименте по обнаружению и исследованию отражения ультррелятивистских протонов с энергией 400 ГэВ на ускорителе SPS CERN изогнутыми атомными плоскостями монокристалла кремния с помощью измерительной системы на базе 3-ПЧД получены следующие результаты:
  - измеренная эффективность отражения протонов с энергией 400 ГэВ одиночным изогнутым кристаллом составляет  $(98,0 \pm 0,6) \%$ ;
  - угол отражения равен 12 мкрад.
2. В CERN с помощью измерительной системы на базе 3-ПЧД измерено объёмное отражение протонов с энергией 400 ГэВ сборкой из двух монокристаллов кремния и получены следующие результаты:

- эффективность отражения сборкой из двух изогнутых кристаллов составляет  $(96,6 \pm 0,7) \%$ ;
  - суммарный угол отражения 23 мкрад.
3. Разработаны и исследованы 3-ПЧД с пространственным разрешением (шагом стрипов) 500 мкм, 200 мкм, 100 мкм и 50 мкм. Решены конструктивные и технологические проблемы детектора, оптимизирована электроника параллельной передачи данных.

Показано, что измерительная система на базе 3-ПЧД может работать при нагрузках до  $\sim 10^8$  частиц/см<sup>2</sup>с без внешнего триггера в счётном режиме. Детектор позволяет измерять профили пучков заряженных частиц и мягкого рентгеновского излучения с высоким пространственным разрешением.

В процессе апробации 3-ПЧД обнаружено объёмное отражение протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым монокристаллом кремния на ускорителе ПИЯФ РАН.

4. Создана система сбора, передачи, обработки и представления экспериментальных данных, поступающих с 3-ПЧД.

Явление объёмного отражения может быть использовано для управления пучками протонов высоких энергий, так как эффективность этого процесса близка к 100%, например, для отклонения пучков или для очистки гало ускорителя ЛНС. Для увеличения угла отражения протонов следует использовать сборку из нескольких изогнутых кристаллов, ориентированных оптимальным образом как относительно пучка, так и относительно друг друга.

Разработанный и созданный в ПИЯФ 3-ПЧД обладает высокой нагрузочной способностью и хорошим пространственным разрешением, что в сочетании с простотой конструкции позволяют использовать его для решения различных задач в области физики высоких энергий, медицине и дефектоскопии.

**Список публикаций автора по теме диссертации.**

1. В. Г. Ивочкин, С. И. Воробьёв, С. В. Косьяненко. Создание активной мишени для «поверхностных» мюонов на основе плоскопараллельной камеры. Препринт ПИЯФ-2507, Гатчина, 2003, 13 с.
2. С. И. Воробьёв, В. А. Гордеев, А. А. Жданов, Ю. В. Ёлкин, В. Г. Ивочкин, Е. Н. Комаров, С. В. Косьяненко, Ю. А. Щеглов, Г. В. Щербаков. Плоскопараллельная камера как детектор остановок мюонов для активной мишени проекта ФАМИЛОН. ПТЭ, 2005, N5, с.29-35.
3. Ю. М. Иванов, Н. Ф. Бондарь, Ю. А. Гавриков, А. С. Денисов, А. В. Желамков, В. Г. Ивочкин, С. В. Косьяненко, Л. П. Лапина, А. А.

- Петрунин, В. В. Скоробогатов, В. М. Суворов, А. И. Щетковский, А. М. Таратин, В. Скандале. Объемное отражение протонов с энергией 1ГэВ изогнутым кристаллом кремния. Письма в ЖЭТФ, 2006, т.84, с.445-450.
4. Walter Scandale, Dean A. Still, Alberto Carnera, Gianantonio Della Mea, Davide De Salvador, Riccardo Milan, Alberto Vomiero, Stefano Baricordi, Pietro Dalpiaz, Massimiliano Fiorini, Vincenzo Guidi, Giuliano Martinelli, Andrea Mazzolari, Emiliano Milan, Giovanni Ambrosi, Philipp Azzarello, Roberto Battiston, Bruna Bertucci, William J. Burger, Maria Ionica, Paolo Zuccon, Gianluca Cavoto, Roberta Santacesaria, Paolo Valente, Erik Vallazza, Alexander G. Afonin, Vladimir T. Baranov, Yury A. Chesnokov, Vladilen I. Kotov, Vladimir A. Maishev, Igor A. Yaznin, Sergey V. Afansiev, Alexander D. Kovalenko, Alexander M. Taratin, Alexander S. Denisov, Yury A. Gavrikov, Yuri M. Ivanov, Vladimir G. Ivochkin, Sergey V. Kosyanenko, Anatoli A. Petrunin, Vyacheslav V. Skorobogatov, Vsevolod M. Suvorov, Davide Bolognini, Luca Foggetta, Said Hasan, Michela Prest. High-efficiency volume reflection of an ultrarelativistic proton beam with a bent silicon crystal. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, v.98, N15, p.154801.
  5. Walter Scandale, Alberto Carnera, Gianantonio Della Mea, Davide De Salvador, Riccardo Milan, Alberto Vomiero, Stefano Baricordi, Pietro Dalpiaz, Massimiliano Fiorini, Vincenzo Guidi, Giuliano Martinelli, Andrea Mazzolari, Emiliano Milan, Giovanni Ambrosi, Philipp Azzarello, Roberto Battiston, Bruna Bertucci, William J. Burger, Maria Ionica, Paolo Zuccon, Gianluca Cavoto, Roberta Santacesaria, Paolo Valente, Erik Vallazza, Alexander G. Afonin, Vladimir T. Baranov, Yury A. Chesnokov, Vladilen I. Kotov, Vladimir A. Maishev, Igor A. Yaznin, Sergey V. Afanasiev, Alexander D. Kovalenko, Alexander M. Taratin, Alexander S. Denisov, Yury A. Gavrikov, Yuri M. Ivanov, Vladimir G. Ivochkin, Sergey V. Kosyanenko, Lyubov P. Lapina, Anatoli A. Petrunin, Vyacheslav V. Skorobogatov, Vsevolod M. Suvorov, Davide Bolognini, Luca Foggetta, Said Hasan, Michela Prest. Double volume reflection of a proton beam by a sequence of two bent crystals. *Phys. Lett. B*, 2008, v.660 p.610-611.