

## УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЯМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ИЗОГНУТОГО МОНОКРИСТАЛЛА

*А.С.Водопьянов, В.М.Головатюк, А.Ф.Елишев,  
И.М.Иванченко, Р.Б.Кадыров, Н.Н.Карпенко,  
В.В.Кореньков, Т.С.Нигманов, В.Д.Рябцов,  
А.Е.Сеннер, Б.Ситар, Б.М.Старченко,  
В.А.Сутулин, И.А.Тяпкин, Д.В.Уральский,  
Н.А.Филатова, Э.Н.Цыганов, М.Д.Шафранов*

*И.Войтковска, З.Гузик, Р.Желязны, А.Форыцки,*

*И.А.Гришаев, Г.Д.Коваленко, Б.И.Шраменко*

*М.Д.Бавижев, Н.К.Булаков*

*Р.Карриган, Т.Тунг*

*В.М.Гибсон, Ч.Р.Сан, Ик-Джо Ким, Дж.Феллс*

*В.В.Авдейчиков*

Впервые экспериментально показано, что с помощью изогнутого монокристалла можно управлять траекториями заряженных частиц. Протоны с энергией 8,4 ГэВ, захваченные в процесс плоскостного каналирования изогнутым монокристаллом кремния, отклонялись на угол до 26 мрад. Радиус кривизны траектории частицы составлял около 38 см, что соответствует среднему значению поперечного электрического поля, воздействующего на частицу, около 240 МВ/см. Это эквивалентно магнитному полю с индукцией около 0,82 Мгс.

В работе [1] предсказывалось, что деформированные монокристаллы можно использовать для управления траекториями заряженных частиц, захваченных в процесс каналирования. Критический радиус кривизны траектории частиц, при котором еще возможно их удержание изогнутой кристаллографической плоскостью, определяется выражением:

$$R = Mv^2/E_c Z_e.$$

Здесь  $M$  — релятивистская масса частицы,  $v$  — ее скорость,  $Z_e$  — заряд частицы,  $E_c$  — значение усредненного электрического поля на таком

расстоянии от плоскости кристаллической решетки, где движение частицы в режиме каналирования становится неустойчивым из-за взаимодействия с одиночными атомами. В случае кремния величина  $E_c$  равна около  $0,5 \cdot 10^{10}$  В/см.

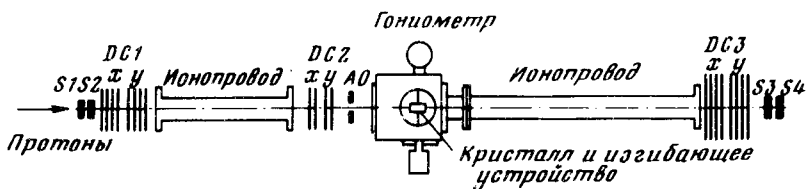


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: S1, S2, S3, S4, A<sub>0</sub> — сцинтилляционные счетчики, DC1, DC2, DC3 — блоки дрейфовых камер

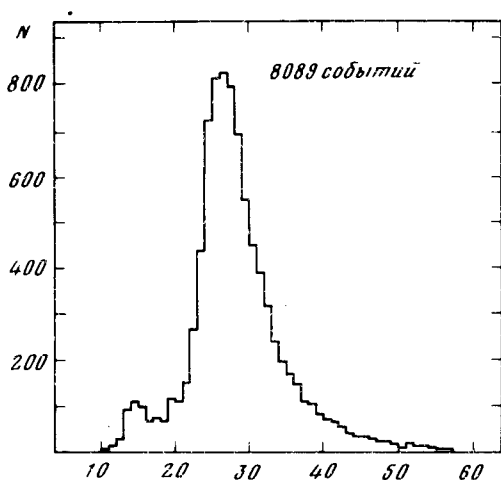


Рис. 2. Амплитудное распределение ионизационных потерь в полупроводниковом детекторе. Кристалл ориентирован плоскостью (111) по пучку

Целью настоящего эксперимента являлась проверка этой гипотезы. Эксперимент выполнен в ЛВЭ ОИЯИ на выведенном из синхрофазотрона протонном пучке. Пучок с энергией 8,4 ГэВ имел угловую расходимость  $\pm 0,3$  мрад, его поперечный размер в месте расположения кристалла составляет около 2 см. Исследования проводились при интенсивности пучка  $10^5$  частиц за цикл ускорителя, время растяжки было равно 0,3 — 0,4 сек.

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Траектории частиц, проходящих через кристалл, определялись с помощью спектрометра из 20 дрейфовых камер. Общая длина установки равнялась 18 м. Установка работала на линии с ЭВМ. На магнитную ленту записывалось до 500 событий за цикл ускорителя. Спектрометр запускался системой сцинтилляционных счетчиков, которая выделяла частицы, попадающие в рабочую зону монокристалла. Для ориентации кристалла служил прецизионный гониометр с ценой деления одного отсчета  $0,001^\circ$ . Пучок протонов проходил через монокристалл кремния длиной 20 мм, часть которого могла подвергаться контролируемому изгибу. Критический радиус для протонов с энергией 8,4 ГэВ в случае кремния равен около 2 см. Изгибалась плоскость (111) монокристалла, длина изгибаемой части составляла 10 мм.

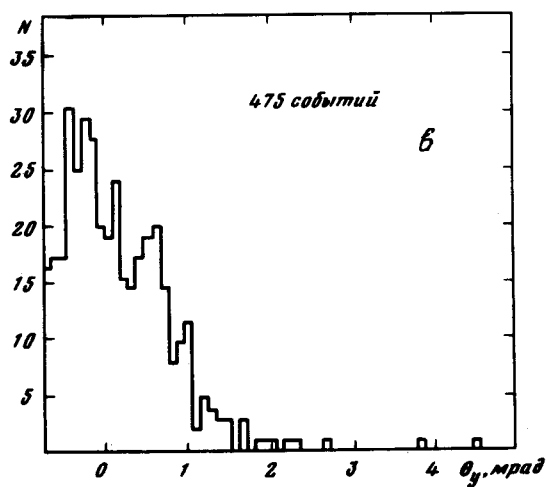
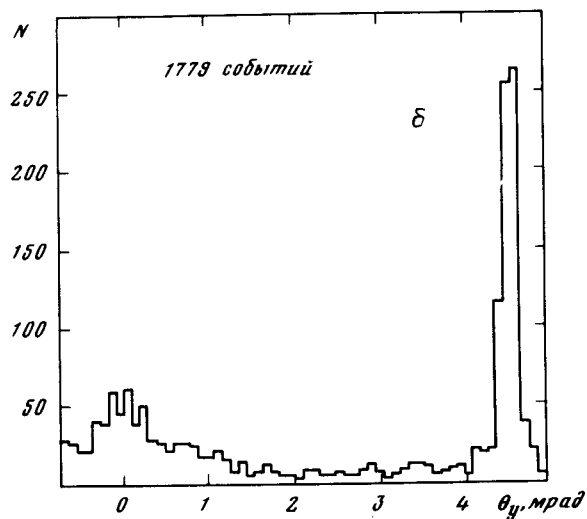
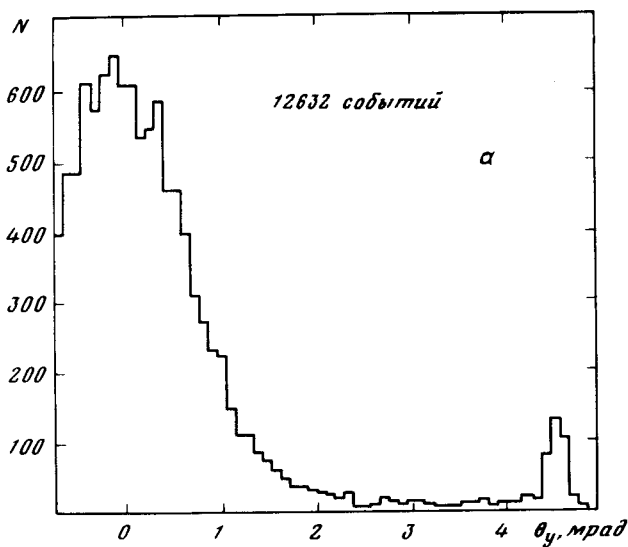


Рис. 3. Распределение частиц, выходящих из кристалла, по углам в вертикальной плоскости :  $a$  – угол изгиба 4,5 мрад ,  $b$  – то же, что и на рис. 3,  $a$  с дополнительным отбором событий по критериям каналирования;  $v$  – то же, что и на рис. 3,  $a$ , но с отбором событий только для неканалирующих частиц

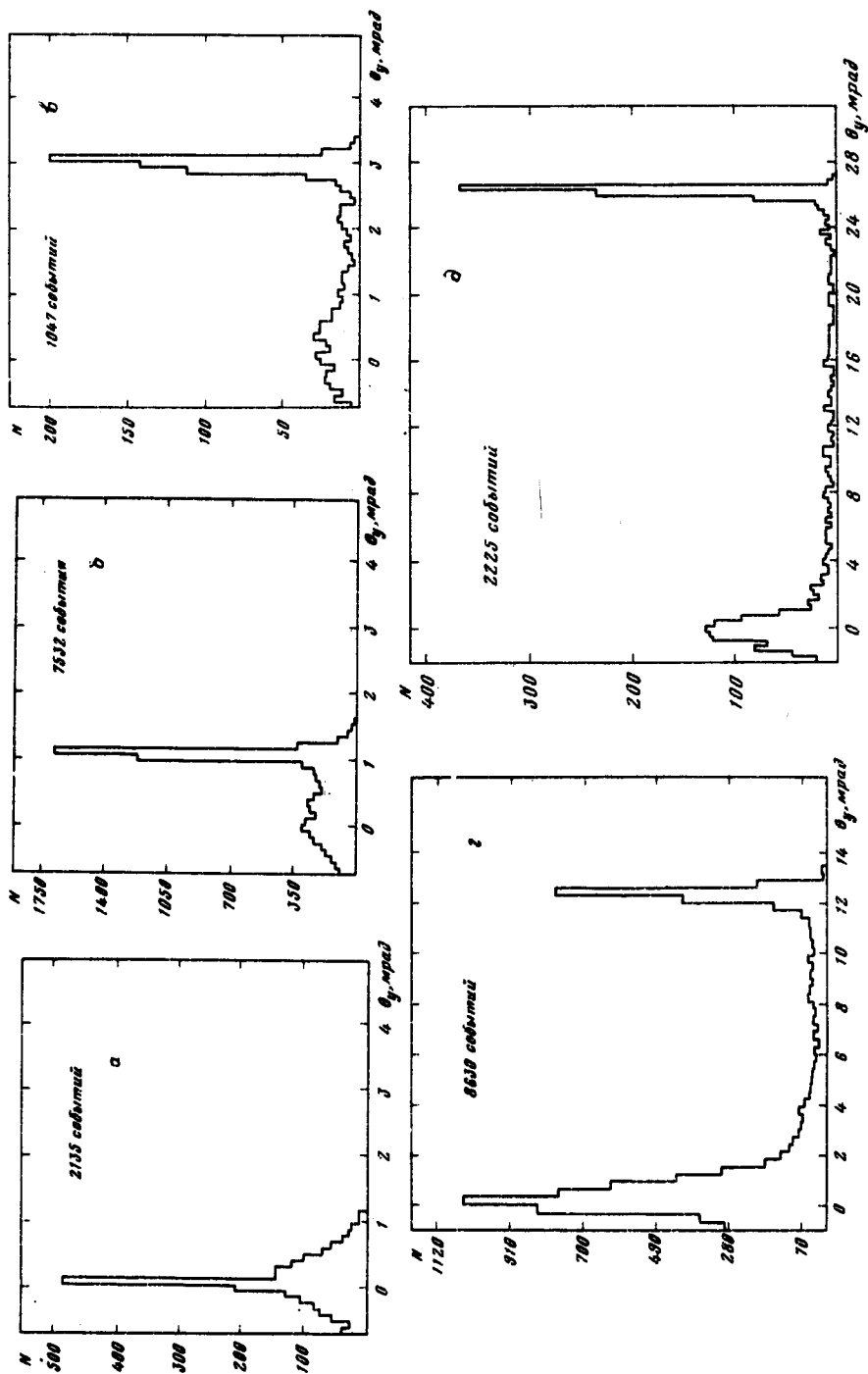


Рис. 4. Распределение частиц по углам выхода в вертикальной плоскости при разных углах изгиба кристалла: а — 0,0 мрад, б — 1,0 мрад, в — 3,0 мрад, г — 12,5 мрад (критерий по углу рассеяния в горизонтальной плоскости не использован), д — 26,0 мрад. События отобраны по критериям канализования

Входная часть монокристалла представляла собой полупроводниковый детектор. На рис. 2 приведен амплитудный спектр сигналов от частиц, проходящих через детектируемую часть кристалла, ориентированного плоскостью (111) вдоль пучка частиц. Видно, что по величине ионизационных потерь можно выделить частицы, захваченные в процесс каналирования.

Измерения проводились при углах изгиба кристалла в вертикальной плоскости 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,5; 12,5; 26,0 мрад. Найдено, что каналирующая часть пучка следует за изгибом кристаллографической плоскости (111). При этом для всех углов не наблюдалось заметного увеличения числа деканалирующих частиц, связанного с изгибом кристалла. На рис. 3,а приведено угловое распределение для частиц, выходящих из кристалла, при угле изгиба 4,5 мрад. Справа от широкого пика, обусловленного частицами, испытывающими многократное рассеяние в образце, наблюдается узкий пик, связанный с исследуемым эффектом. На рис. 3,б приведено угловое распределение событий, отобранных по критериям выделения каналирующих частиц. Для этого распределения выделялись события, у которых амплитуда сигнала соответствовала диапазону 0,2 – 0,7 амплитуды в максимуме спектра. Кроме этого требовалось, чтобы частицы в горизонтальной плоскости не испытывала рассеяния на угол больше  $\pm 0,1$  мрад. Рис. 3,б подтверждает, что правый пик соответствует каналирующим частицам. На рис. 3,в приведено угловое распределение с отбором событий по "жестким" критериям, исключающим каналирующие частицы. Из этого рисунка также следует, что правый пик обусловлен явлением отклонения каналирующих частиц изогнутым монокристаллом. На рис. 4 приведены распределения событий по углу выхода в вертикальной плоскости для различных углов изгиба кристалла. События отобраны по тем же критериям, что и для распределения, изображенного на рис. 3,б. Видно, что угловое положение пика каналирующих частиц соответствует углу изгиба кристалла. Для угла изгиба кристалла 26 мрад значение эффективного поперечного электрического поля, усредненного вдоль траектории частицы, составляет 240 МВ/см.

Таким образом, впервые экспериментально показано, что с помощью изогнутого монокристалла можно управлять траекториями заряженных частиц. Это новое явление может найти применение в физике высоких энергий.

Авторы благодарны профессору Н.Н.Боголюбову, профессору Д.Д.Кишу, профессору А.М.Балдину, профессору Р.Вилсону и профессору Л.Ледерману за поддержку при проведении исследований.

Поступила в редакцию  
11 августа 1979 г.

Сотрудничество

Дубна – Свердлов – Харьков – Томск – Батавия – Нью-Йорк – Ленинград

### Литература

[1] E.N.Tsyganov. Fermilab TM-682, TM-684, Batavia, 1976.