

Объемное отражение протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом кремния

Ю. М. Иванов¹⁾, 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*

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН, 188300, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

⁺Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Московская обл., Россия

* European Organization for Nuclear Research, CERN CH-1211 Geneve 23, Switzerland

Поступила в редакцию 11 сентября 2006 г.

Наблюдено объемное отражение протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом. Кристалл был изготовлен из монокристаллического кремния, атомные (111) плоскости были изогнуты за счет упруго-квазимозаичного эффекта, что позволило уменьшить длину кристалла по пучку до 30 мкм. Установлено, что эффект отражения имеет большую вероятность, чем эффект каналирования (0,71 против 0,63), и угол отклонения протонов, отраженных внутри кристалла, составляет (1.39 ± 0.04) в единицах критического угла каналирования для условий проведенного опыта (170 мкрад). Ширина отраженного пика равна (1.76 ± 0.04) в тех же единицах. Сделано важное наблюдение, состоящее в том, что в угловом положении максимального каналирования не захваченные в каналирование протоны испытывают объемное отражение и отклоняются на угол (1.01 ± 0.05) в единицах критического угла каналирования в сторону, противоположную каналированному пучку. Ширина отраженного пика равна (1.94 ± 0.08) в тех же единицах.

PACS: 29.27.-a, 61.10.-i, 61.85.+p, 62.20.Dc

Недавно при изучении каналирования протонов с энергией 70 ГэВ был наблюден предсказанный ранее эффект объемного отражения заряженных частиц в изогнутом кристалле [1, 2]. В качестве короткого (по пучку) изогнутого кристалла авторы опыта использовали пластинку кремния с упругой квазимозаикой [3] и с помощью фотоэмульсионной методики определили угол отклонения объемно отраженных частиц, а также получили качественную оценку вероятности процесса отражения [4, 5]. В согласии с предсказанием угол отклонения оказался близок удвоенному критическому углу каналирования, а вероятность отражения оказалась больше вероятности каналирования.

Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающего протона с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит при движении частицы по касательной к изогнутой атомной плоскости, приводя к отклонению траектории в сторону, противоположную изгибу. Теоретическая вероятность отражения высока, хотя и не достигает единицы из-за некогерентного многократного рассеяния на ядрах и электронах среды, приводящего к объемному захвату в режим каналирования. Отклонение, вызванное

многократным рассеянием, с ростом энергии падает быстрее, чем критический угол каналирования, что в итоге уменьшает вероятность объемного захвата и увеличивает вероятность отражения. Это открывает перспективу применения эффекта отражения в кристаллооптике пучков заряженных частиц высоких и сверхвысоких энергий.

Исследование объемного отражения при разных энергиях частиц имеет значение для проверки теоретического описания эффекта и создает основу для разработки возможных практических приложений. Цель настоящей работы заключалась в измерении эффекта объемного отражения при энергии протонов 1 ГэВ.

Эксперимент был поставлен на протонном синхротроне ПИЯФ. Метод измерений (рис.1) состоял в формировании достаточно узкого почти параллельного пучка протонов, падающего на кристалл, и изучении распределения отклоненных кристаллом протонов с помощью быстрых детекторов с высоким позиционным разрешением. Условие наблюдения объемного отражения заключалось в том, чтобы расходимость протонного пучка и многократное рассеяние в кристалле были меньше критического угла каналирования (равного 170 мкрад для плоскостей (111) кремния и энергии протонов 1 ГэВ).

¹⁾e-mail: yumi@pnpi.spb.ru



Рис.1. Схема опыта по наблюдению объемного отражения на пучке протонов с энергией 1 ГэВ

Формирование пучка было выполнено с помощью двух коллиматоров, имевших в длину около 1 м и отстоявших друг от друга на 31 м, и отклоняющего магнита между ними. Весь тракт от ускорителя до детекторов был в вакууме, включая узел кристалла. Апертура первого коллиматора составляла 5 мм (гориз.) \times 10 мм (верт.), апертура второго 0.5 мм (гориз.) \times 1 мм (верт.). Дальнейшее уменьшение ширины зазора второго коллиматора выполнялось его поворотом в горизонтальной плоскости (протоны, прошедшие через края коллиматора в повернутом положении, рассеивались на значительные углы и выбывали из области наблюдения ориентационных эффектов в кристалле). Величина зазора контролировалось по изменению скорости счета удаленного узкого детектора на максимуме профиля прошедшего через коллиматор пучка. Согласно выполненным измерениям, полуширина настроенного протонного пучка в горизонтальной плоскости на выходе из второго коллиматора была равна 80 ± 20 мк, а угловая расходимость (полуширина) в этой же плоскости составляла (160 ± 20) мкрад. Интенсивность рабочего пучка во время измерений была около $2 \cdot 10^4$ р/с.

В качестве рабочего кристалла была применена тонкая изогнутая кремниевая пластинка с упругой квазимозаикой, похожая на пластинку, использованную в [4, 5]. Особенности приготовления кремниевых квазимозаичных пластинок описаны в [3]. Протоны проходили через пластинку перпендикулярно большим граням, поэтому их пробег в веществе был равен ее толщине. Толщина пластинки, равная 30 мкм, была выбрана на основе моделирования ожидаемых ориентационных эффектов по модели [1, 2]. Расчетное значение среднеквадратичного угла отклонения протонов с энергией 1 ГэВ на длине 30 мкм в кремнии равнялось 105 мкрад и удовлетворяло условию наблюдения объемного отражения.

Пластинка имела высоту 10 мм и такую же ширину. Канализующие плоскости (111) были перпендикулярны большой грани и в рабочем положении расположены вертикально и касательно налетающим протонам. Пластинка была изогнута по радиусу 22 мм путем зажатия в цилиндрические зеркала, имевшие в центре отверстие диаметром 3 мм для прохождения протонного пучка. Образующая цилиндрических зеркал в рабочем положении была горизонтальна. При изгибе нормальные сечения пластинки, совпадающие с атомными плоскостями (111), искривлялись вследствие упругоэластического эффекта. Расчетный изгиб плоскостей (111) был равен 385 мкрад. Изгиб, измеренный с помощью рентгеновского излучения, оказался равен (380 ± 20) мкрад.

Изогнутая пластинка в пределах апертуры изгибающего устройства имела седлообразную форму, что было установлено оптическими и рентгеновскими измерениями. Согласно более точным рентгеновским измерениям радиус кривизны в горизонтальной плоскости, перпендикулярной плоскости основного изгиба, был равен 33 см. Такая форма изогнутой пластинки соответствовала веерообразному расположению канализующих атомных плоскостей (111) в горизонтальной плоскости и приводила к тому, что на ширине сформированного протонного пучка, равной 80 мкм, разворот плоскостей составлял примерно 240 мкрад. Поскольку угол изгиба (111) плоскостей был равен 380 мкрад и существенно превосходил их разворот, это не могло препятствовать наблюдению объемного отражения.

Изогнутый кристалл был установлен на поворотный столик, укрепленный на выходном торце второго коллиматора таким образом, чтобы совпадали центр кристалла и ось протонного пучка. Столик имел дистанционно управляемый шаговый двигатель, один

шаг которого отвечал повороту кристалла на угол 62,5 мкрад.

На расстоянии 5 м от кристалла располагались позиционно-чувствительные детекторы. Вакуумный тракт заканчивался непосредственно перед ними, толщина выходного каптонового окошка составляла 80 мкм. Воздушный зазор между окошком и детекторами был около 20 см.

Первый детектор представлял собой плоскопараллельный позиционно-чувствительный газовый счетчик с рабочим объемом $0.6 \times 10 \times 12.8$ мм. Рабочая газовая смесь состояла из 70% аргона и 30% двуокиси углерода при атмосферном давлении. На счетчик подавалось напряжение 1750 В. Анодная плоскость была разбита на 64 полоски длиной 10 мм и шириной 150 мкм, нанесенные с шагом 200 мк. Сигнал с каждой полоски поступал на свой предусилитель и формирователь. Электроника переднего уровня была выполнена на 16-канальной микросхеме СМР16, бывшей прототипом схемы анодного считывания пропорциональных камер торцевой мюонной системы CMS. В рабочем положении счетчика электроды были горизонтальны, протонный пучок проходил между ними параллельно анодным полоскам. Ионизация на длине 10 мм от протона, пролетевшего через газовый зазор вблизи катода, приводила к образованию лавины и формированию сигнала. Сигналы от протонов, пролетевших вблизи анода, были ниже порога регистрации. Ширина чувствительной зоны счетчика в вертикальном направлении, измеренная с помощью коллимированного рентгеновского излучения от медной трубки, составляла примерно половину зазора между электродами счетчика (~ 300 мк).

Второй детектор состоял из двух сцинтилляционных счетчиков, включенных на совпадения. В каждом из счетчиков сцинтиллятором служила полоска пластика толщиной 50 мк, шириной 5 мм и длиной 15 мм. Полоски были расположены толщиной поперек протонного пучка, а длиной – вертикально в первом по пучку счетчике и горизонтально во втором. Расстояние между счетчиками составляло 10 см. Пробег протонов в каждом из счетчиков был равен ширине полоски (5 мм). Детектор был установлен на каретку с точным линейным перемещением в горизонтальном направлении.

Таким образом, оба детектора имели ограниченную по высоте область регистрации протонов и позволяли измерить профиль пучка в горизонтальной плоскости. Ограничение по высоте было существенно, поскольку радиус изгиба кристалла в вертикальной плоскости был весьма мал. Проверки с рентгеновским излучением показали, что централь-

ная часть кристалла высотой 1 мм не искажает форму кривой качания. Размер чувствительной зоны по высоте в обоих детекторах был существенно меньше 1 мм.

Для контроля интенсивности протонного пучка использовались два высокоэффективных сцинтилляционных счетчика с размерами около 10×10 см² в плоскости, поперечной пучку, расположенных за основными детекторами и включенных на совпадения.

Плоскопараллельный счетчик, обладавший высоким быстродействием и позиционной чувствительностью, был использован для поиска ориентации кристалла, отвечавшей каналированию протонов. В найденном положении падающий пучок расщепился на два, одновременно зарегистрированные плоскопараллельным счетчиком. После этого прилежащая к углу каналирования область возможных ориентационных эффектов была просканирована с малым (относительно критического угла каналирования) шагом.

На рис.2 показаны результаты измерения. По оси абсцисс отложена координата анодной полоски в миллиметрах. Нулевое значение соответствует положению оси первичного пучка. По оси ординат отложен угол кристалла в микро радианах. Нулевое положение соответствует совпадению оси первичного пучка с касательной к (111) плоскостям на входной грани кристалла. Цвет точки соответствует числу протонов, цветовая шкала показана справа от графика. В каждой угловой точке полное число событий составляет 10^4 , накопленных в среднем за 20 с.

Из графика хорошо видно, что при прохождении протонов под малыми углами к изогнутым кристаллографическим плоскостям наблюдаются два эффекта, противоположно отклоняющих частицы относительно начального направления движения. Эффекты проявляются в разных угловых областях, имеющих частичное перекрытие. По величине и знаку изгиба атомных плоскостей правый пик легко определяется как область действия эффекта каналирования, левый пик – как область действия эффекта отражения. Нижний и верхний пики соответствуют первичному пучку, прошедшему неориентированный кристалл. Полуширина угловой области, отвечавшей ослаблению прямого пучка в два раза, составила (620 ± 30) мкрад, что примерно соответствует сумме угла изгиба (111) плоскостей и удвоенного критического угла каналирования, равной (720 ± 20) мкрад.

Точные измерения профиля пучка при различных угловых положениях кристалла были выполнены с помощью сцинтилляционного детектора, имевшего более высокое позиционное разрешение. Измерения проводились в следующей последовательности.

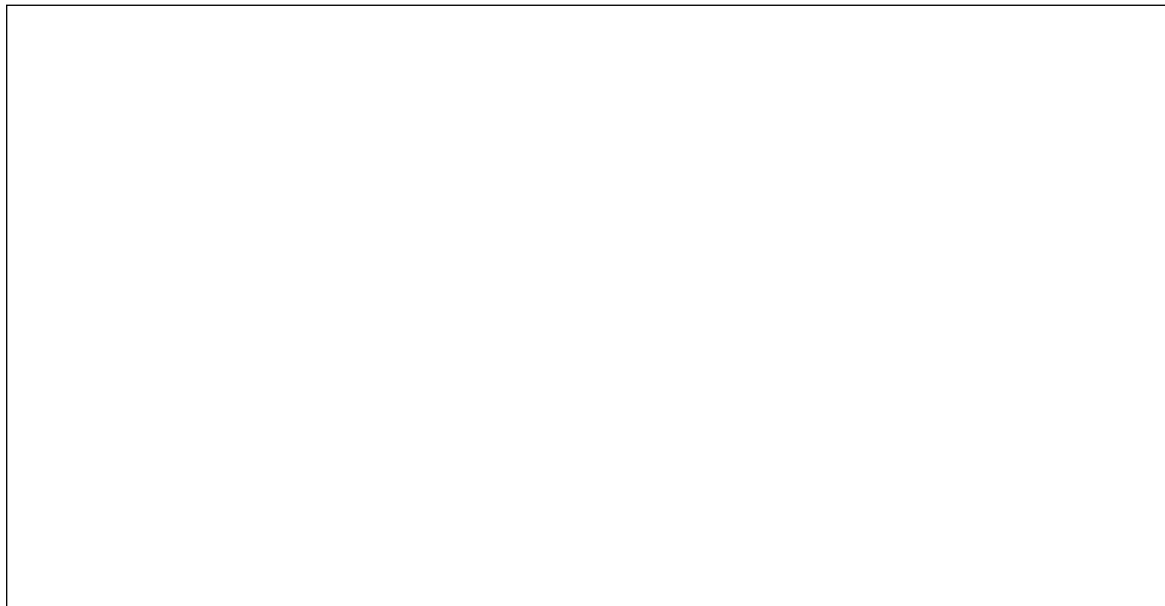


Рис.2. Профиль пучка в зависимости от углового положения кристалла, измеренный с помощью плоскопараллельного позиционно-чувствительного газового счетчика

Сначала был измерен профиль пучка при неориентированном кристалле, что позволило определить с погрешностью ± 0.02 мм положение оси прямого пучка. Это измерение было проделано несколько раз, разброс полученных значений оказался в пределах указанной ошибки. Положение прямого пучка было принято в качестве “нулевой” точки отсчета при вычислении смещений пучков, отклоненных кристаллом.

Вместе с положением была определена также ширина прямого пучка, прошедшего кристалл, она составила (1.49 ± 0.04) мм. Отношение ширины к расстоянию между кристаллом и детектором дало значение угловой расходимости (полуширины) прямого пучка после прохождения кристалла, равное (298 ± 8) мкрад, совпавшее с квадратичной суммой, равной (290 ± 30) мкрад, расходимости пучка до кристалла и угловой полуширины многократного рассеяния в кристалле.

На рис.3 показан результат измерения профиля пучка, прошедшего кристалл в угловом положении, примерно (с погрешностью до половины шага гониометра) соответствующем максимальной интенсивности каналированного пучка. Там же штриховой линией проведен профиль пучка, соответствующий неориентированному кристаллу. Из графика видно, что первичный пучок разделяется на два, отклоненных в противоположные стороны. Большой по амплитуде правый пик отвечает каналированному пучку, меньший по амплитуде левый пик – объемно отраженному пучку. Результаты фитирования профиля двумя гауссианами и линейным фоном представлены в табл.1. Делением линейных величин на расстояние между кристаллом и детектором были получены угловые отклонения и полуширины обоих пучков, также приведенные в табл.1.

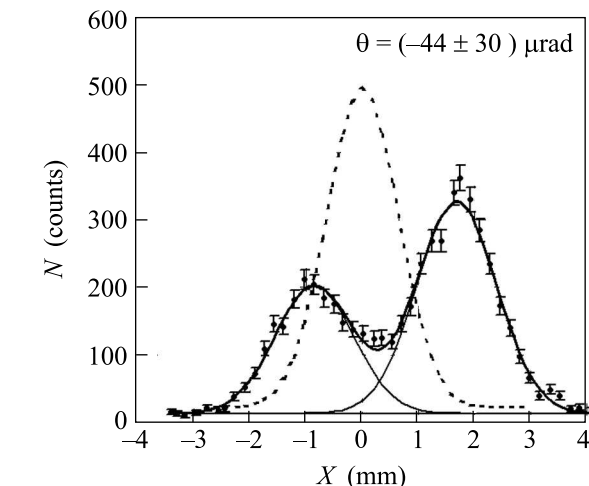


Рис.3. Профиль пучка в угловом положении кристалла, отвечавшем максимальному каналированию, измеренный с помощью сцинтилляционного детектора. Время накопления в каждой точке равно 10 с

ку, меньший по амплитуде левый пик – объемно отраженному пучку. Результаты фитирования профиля двумя гауссианами и линейным фоном представлены в табл.1. Делением линейных величин на расстояние между кристаллом и детектором были получены угловые отклонения и полуширины обоих пучков, также приведенные в табл.1.

Разность отклонения каналированного пучка и изгиба (111) плоскостей равна (-44 ± 30) мкрад. Она

Таблица 1

Результаты обработки профиля пучка, прошедшего кристалл в положении (-44 ± 30) мкрад ($\chi^2=1.38$ на степень свободы)

Параметр	Отражение	Каналирование
Отн. интенсивность	0.37 ± 0.02	0.63 ± 0.03
Положение, мм	-0.86 ± 0.04	1.68 ± 0.03
Полуширина, мм	1.65 ± 0.07	1.66 ± 0.05
Угл. отклонение, мкрад	-172 ± 8	366 ± 6
Угл. полуширина, мкрад	330 ± 14	333 ± 10

характеризует угол θ между осью первичного пучка и касательной к (111) плоскости в точке пересечения оси пучка и входной грани кристалла. Для всех остальных угловых положений кристалла угол θ был найден прибавлением (вычитанием) к указанной выше разности величины углового поворота кристалла относительно положения максимального каналирования. Положительный знак поворота соответствовал смещению точки касания оси пучка и изогнутой атомной плоскости (111) от выходной грани кристалла к входной.

На рис.4 показан результат измерения профиля пучка, прошедшего через кристалл, находившийся

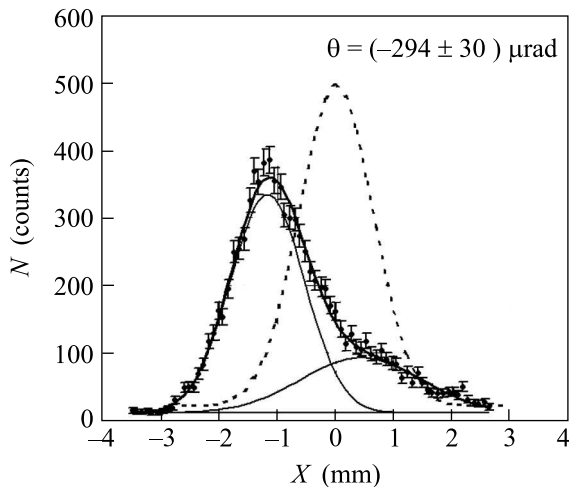


Рис.4. Профиль пучка в угловом положении кристалла, отвечавшем максимальному объемному отражению, измеренный с помощью сцинтилляционного детектора. Время накопления в каждой точке равно 10 с

в угловом положении $\theta = (-294 \pm 30)$ мкрад, отвечавшем максимальному эффекту объемного отражения (штриховой линией показан профиль пучка для неориентированного кристалла). Измеренный профиль представляет собой несимметричный пик, образованный наложением двух процессов – объемного отражения и объемного захвата в каналирова-

ние. Расчетное положение пика каналирования равно $(380 - 294) = 86$ мкрад или 0.43 мм по линейной шкале, что было использовано при фитировании измеренного профиля двумя гауссианами и линейным фоном. Результаты фитирования представлены в табл.2.

Таблица 2

Результаты обработки профиля пучка, прошедшего кристалл в положении (-294 ± 30) мкрад ($\chi^2=1.00$ на степень свободы)

Параметр	Отражение	Каналирование
Отн. интенсивность	0.71 ± 0.03	0.29 ± 0.02
Положение, мм	-1.18 ± 0.03	0.43 (фикс.)
Полуширина, мм	1.50 ± 0.03	2.44 ± 0.11
Угл. отклонение, мкрад	-236 ± 6	86 (фикс.)
Угл. полуширина, мкрад	300 ± 6	488 ± 22

На основе полученных данных можно заключить, что эффект отражения имеет большую вероятность, чем эффект каналирования (0.71 против 0.63), и угол отклонения протонов, отраженных внутри кристалла, составляет 1.39 ± 0.04 в единицах критического угла каналирования для условий проведенного опыта. Ширина отраженного пика равна 1.76 ± 0.04 в тех же единицах. Тем самым подтверждается наблюдение эффекта объемного отражения, сделанное при энергии протонов 70 ГэВ [4, 5].

Новое важное наблюдение состоит в том, что в угловом положении максимального каналирования не захваченные в каналирование протоны испытывают объемное отражение и отклоняются на угол 1.01 ± 0.05 в единицах критического угла каналирования, ширина отраженного пика равна 1.94 ± 0.08 в тех же единицах.

Результаты выполненного исследования и исследования [4, 5] важны для применений кристаллов в системах формирования и коллимации пучков в коллайдерах. Так, они позволяют предположить, что именно эффект объемного отражения, а не эффект объемного захвата, который весьма мал и убывает с ростом энергии частиц, привел к ориентационной кривой, наблюдаемой в работе [6] на RHIC в BNL. Особенность этой кривой в том, что ориентационные эффекты, зарегистрированные монитором потерь вблизи кристалла, имели место в угловом диапазоне порядка угла изгиба атомных плоскостей, превосходившем критический угол каналирования более чем в 40 раз. Наше объяснение состоит в том, что циркулирующие в кольце протоны гало пучка при каждом пересечении кристалла касательно изогнутым плоскостям испытывали объемное отражение, что приводило к быстрому росту амплитуды бетатронных колебаний и поглощению в стенках ускорителя.

теля. Это уменьшало потери в кристалле, давая провал ориентационной кривой в пределах полного угла изгиба атомных плоскостей.

Авторы благодарны А. А. Воробьеву, Д. М. Селиверстову, В. С. Козлову, Е. М. Иванову, Д. Л. Карлину за поддержку работы, В. А. Гордееву, В. П. Коптеву, А. А. Жданову и Г. В. Щербакову за помощь при создании детекторов, В. А. Горбунову за проведение работ на пучковом канале, О. П. Федоровой и Е. П. Волкову за помощь при изготовлении коллиматора и поворотного столика кристалла, Н. П. Волкову за выполнение механических работ, С. А. Вавилову, Л. Ф. Павловой, Л. А. Щипунову за помощь при измерениях.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 06-02-16912), фонда Президента РФ на проведе-

ние научных исследований (грант # НШ-3057-2006-2), программы “Физика элементарных частиц и фундаментальная ядерная физика” Российской Академии Наук и фонда INTAS- CERN (грант 03-52-6155).

1. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, Phys. Lett. A **119**, 425 (1987).
2. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, NIM PR B **26**, 512 (1987).
3. Ю. М. Иванов, А. А. Петрунин, В. В. Скоробогатов, Письма в ЖЭТФ **81**, 129 (2005).
4. Ю. М. Иванов, А. А. Петрунин, В. В. Скоробогатов, Препринт ПИЯФ №2649, Гатчина (2005), стр. 21.
5. Yu. M. Ivanov, A. A. Petrunin, V. V. Skorobogatov et al., to be published in Phys.Rev.Lett. (2006).
6. R. P. Fliller III, A. Drees, D. Gassner et al., Phys. Rev. ST AB **9**, 013501 (2006).