

ФОКУСИРОВКА ПУЧКА 1 ГэВ-НЫХ ПРОТОНОВ ПРИ ОБЪЕМНОМ ЗАХВАТЕ В РЕЖИМ КАНАЛИРОВАНИЯ ИЗОГНУТЫМ МОНОКРИСТАЛЛОМ

*В.А. Андреев, В.В. Баублис, Е.А. Дамаскинский,
А.Г. Крившич, Л.Г. Кудин, В.В. Марченков, В.Ф. Морозов,
В.В. Нелюбин, Е.М. Орицин, Г.Е. Петров, Г.А. Рябов,
В.М. Самсонов, Л.Э. Самсонов, Э.М. Спириденков,
В.В. Сулимов, О.И. Сумбаев, В.А. Щегельский*

Экспериментально показана возможность фокусировки частиц высоких энергий посредством эффекта объемного захвата частиц в режим каналирования. Протоны с энергией 1 ГэВ при объемном захвате (111)-плоскостью изогнутого кристалла кремния из углового интервала с FWHM = 7,2 мрад на выходе кристалла имели угловую расходимость с FWHM = 1,6 мрад. При этом имело место некоторое (1,8 раза) уменьшение фазового объема пучка каналирующих частиц.

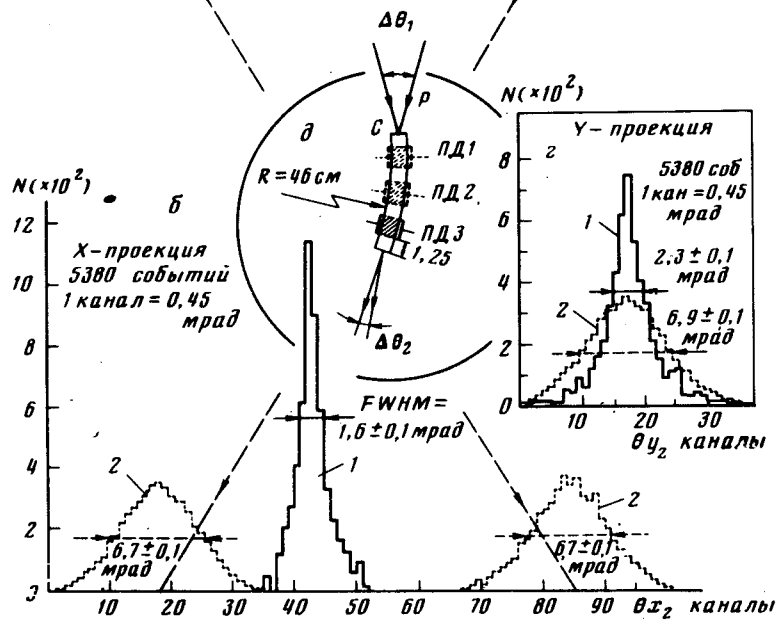
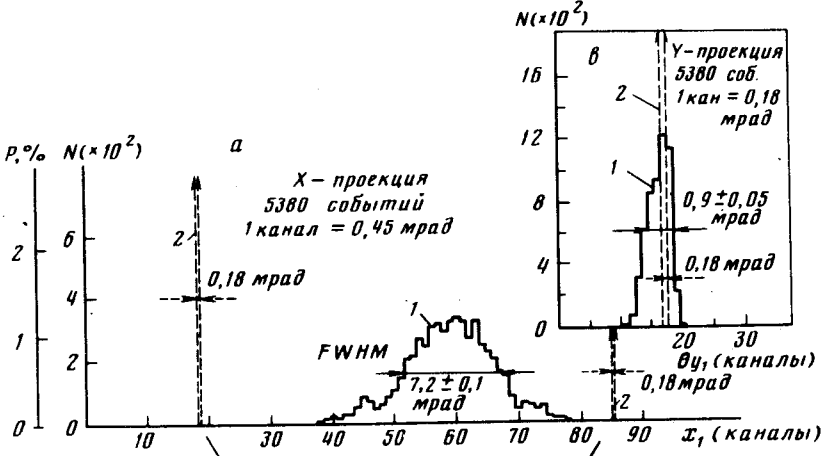
В предыдущей статье¹ нами было экспериментально показано, что изогнутый монокристалл обладает способностью захватывать частицы в режим каналирования в интервале углов много больших, чем угол Линдхарда. Суть этого эффекта, названного "объемным захватом", состоит в том, что условия захвата в режим каналирования для частиц могут возникнуть внутри объема кристалла – в областях, где траектории частиц совпадают с касательной к изогнутой кристаллографической плоскости или оси¹⁾. Таким образом, захват возможен для частиц падающего пучка внутри всего угла между касательными к изогнутым плоскостям в пределах кристалла.

Цель настоящей работы – экспериментально показать, что частицы, захваченные в режим каналирования из широкого углового интервала, на выходе из изогнутого кристалла имеют более узкое угловое распределение, т. е. реализуется эффект фокусировки (по углам). Представленные ниже результаты были получены при дальнейшей обработке экспериментальных данных, полученных на синхротронном ускорителе ЛИЯФ и частично опубликованных¹. Схема опыта и детали экспериментальной установки описаны ранее¹. Пучок протонов с угловой расходимостью $\sigma_x = 1$ мрад и $\sigma_y = 0,4$ мрад направлялся на монокристаллическую кремниевую пластину длиной 1 см, толщиной 0,4 мм, изогнутую по радиусу 46 см (см. рис. 4 данной работы). На кристалле были реализованы три независимые чувствительные зоны, работающие как детекторы dE/dx (ПД1, ПД2 и ПД3). Ширина чувствительных зон 1,5 мм, расстояние между ними 1,5 мм. Расстояние от концов кристалла до ПД1 и ПД3 (так называемые "хвостовики") равно 1,25 мм²⁾. Кристалл поворачивался вокруг оси изгиба относительно прямого пучка с шагом 2 мрад в диапазоне до 44 мрад. Условия выполнения эксперимента

¹⁾ В плоском кристалле объемный захват может иметь место за счет изменения траектории частицы при многократном рассеянии.

²⁾ "Хвостовики" сделаны с целью уменьшения поверхностных токов утечки.

позволили путем объединения всей информации для разных углов разворота кристалла смоделировать входной пучок с постоянной интенсивностью ($2,8 \cdot 10^4$ частиц на канал, равный $0,45$ мрад) в пределах 44 мрад по θ_x , при $\Delta\theta_y = 0,4$ мрад. Выделение каналирующих частиц производилось по величине ионизационных потерь в детекторах (см. ¹).



Угловые распределения частиц на входе в кристалл (а, в) и на выходе из кристалла (б, г): 1 – с отбором по критерию малых ионизационных потерь в детекторе ПД3; 2 – с отбором по критерию нормальных ионизационных потерь; Р – пучок протонов, с – кремниевый монокристалл с детекторными зонами ПД1, ПД2, ПД3.

На рисунке представлены экспериментальные угловые распределения частиц до и после кристалла с отбором по критерию "малых потерь" в ПД3. Распределения относятся к частицам, каналирующим вдоль изогнутой кристаллографической плоскости (111), совпадающей с большой гранью кристалла и нормальной торцу кристалла³⁾. Из углового распределения каналирующих частиц на входе (рис. а) видно, что область захвата $\Delta\theta_{1x} = 7,2$ мрад, при

³⁾ При использованной ориентации вырезки кристалла происходил объемный захват частиц и другими "косыми" плоскостями (см. ¹). Однако, имеющееся угловое разрешение позволило выделить эффект от плоскости (111).

полной угловой ширине входного пучка 44 мрад и возможном угловом диапазоне захвата кристалла (до ПДЗ) ~ 16 мрад. На первой шкале вдоль оси ординат рис. *a* (%) отложена доля частиц (в процентах к падающему пучку), захваченных в режим каналирования из соответствующего участка углового спектра входного пучка. На второй шкале отложены абсолютные числа каналировавших частиц. Обрезание распределения происходит со стороны малых углов и обусловлено эффектом деканалирования частиц ($\lambda = 1,6 \div 1,7$ мм — длина деканалирования), поскольку частицы из этого углового диапазона могут захватываться только в начальной части кристалла и, соответственно, до ПДЗ должны пройти расстояние $l \gg \gg \lambda$. На рис. *б* показано угловое распределение выходящих из кристалла каналирующих частиц. Видно, что частицы, имевшие на входе в кристалл угловое распределение 7,2 мрад, на выходе сфокусированы в примерно 4,5 раза меньший угол. Полученная угловая ширина — 1,6 мрад обусловлена, в основном, приборными факторами: деканалированием частиц в "хвостовике" кристалла и последующим их многократным рассеянием, разбросом этих частиц за счет изгиба "хвостовика", угловым разрешением установки. Для сравнения на рис. *a, б* пунктиром приведены угловые распределения неканалирующих частиц (т. е. имеющих нормальные ионизационные потери) до входа в кристалл (взято узкое распределение 0,18 мрад) и после прохождения кристалла. Полученные выходные распределения (2) имеют FWHM = 6,72 мрад, что точно соответствует эффекту многократного рассеяния для частиц, проходящих кремний (как аморфное тело) толщиной 1 см. На рис. *в, г* приведены *Y*-проекции угловых распределений пучка каналирующих частиц до входа и после выхода из кристалла. Полученная ширина выходного пучка ($\sim 2,3$ мрад) обусловлена, в первую очередь, многократным рассеянием до захвата в объеме кристалла, а также многократным рассеянием деканалированных частиц в "хвостовике" кристалла. На этих же рисунках приведены угловые распределения частиц, имеющих нормальные ионизационные потери.

Существенно, что при наблюдаемой фокусировке может иметь место уменьшение фазового объема пучка. Фазовый объем пучка каналирующих частиц на входе можно оценить на уровне полувысот угловых распределений как $\Phi_1 = \Delta\theta_{1x}\Delta\theta_{1y}S_1 = (6,4 \pm 0,3) \cdot S_1$ (мрад² · мм²), где $S_1 = 4$ мм² — рабочая площадь входного торца кристалла. Аналогичным образом, для выходного пучка $\Phi_2 = \Delta\theta_{2x}\Delta\theta_{2y}S_2 = (3,68 \pm 0,2) \cdot S_2$ (мрад² · см²), где $S_2 = S_1$ — рабочая площадь выходного торца кристалла. Таким образом, фазовый объем сокращается в $1,76 \pm 0,17$ раз. В опыте на кристалле без "хвостовика" естественно ожидать ширину распределения выходящего пучка порядка угла Линдхарда $\Delta\theta_{2x} \approx 2\psi_L = 0,24$ мрад, т. е. пучок может сфокусироваться в ~ 30 раз. Соответственно, будет иметь место значительное (~ 10 раз) уменьшение фазового объема (увеличение яркости) распределения каналирующих частиц. Заметим в связи с этим, что поскольку доля частиц, участвующих в процессе, составляет при наших условиях только порядка 1% падающих на кристалл в пределах угла захвата (см. выше, шкала % на рисунке), вопрос о теореме Лиувилля казался бы не возникает. Стоит заметить, однако, что даже в случае приближения этой доли к 100%, требование второго начала термодинамики

$$k \ln \beta V_{\Phi_1} \leq k \ln \beta V_{\Phi_2} + \frac{\Delta E}{T}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, V_{Φ_1} , V_{Φ_2} — начальный и конечный фазовые объемы пучка, T — абсолютная температура кристалла, накладывает лишь условие на минимальные потери энергии ΔE (на один протон), которые должны иметь место в акте захвата:

$$\Delta E \geq kT \ln \frac{V_{\Phi_1}}{V_{\Phi_2}}, \quad (2)$$

подставляя $V_{\Phi_1} / V_{\Phi_2} \approx 10$, находим (при $T \approx 300$ К)

$$\Delta E \geq 0,06 \text{ эВ.}$$

Вопрос о механизации захвата и природе трения, обеспечивающего необходимые потери, мы надеемся подробнее рассмотреть в одной из ближайших работ.

Таким образом, экспериментально показано, что существование эффекта объемного захвата частиц в режим каналирования позволяет реализовать угловую фокусировку пучков, что может быть использовано в кристаллооптике частиц высоких энергий.

Литература

1. *Адреев В.А., Баублис В.В., Дамаскинский Е.А. и др.* Письма в ЖЭТФ, 30, 340, 1982.

Институт ядерной физики
им. Б.П.Константинова
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 октября 1983 г.
