

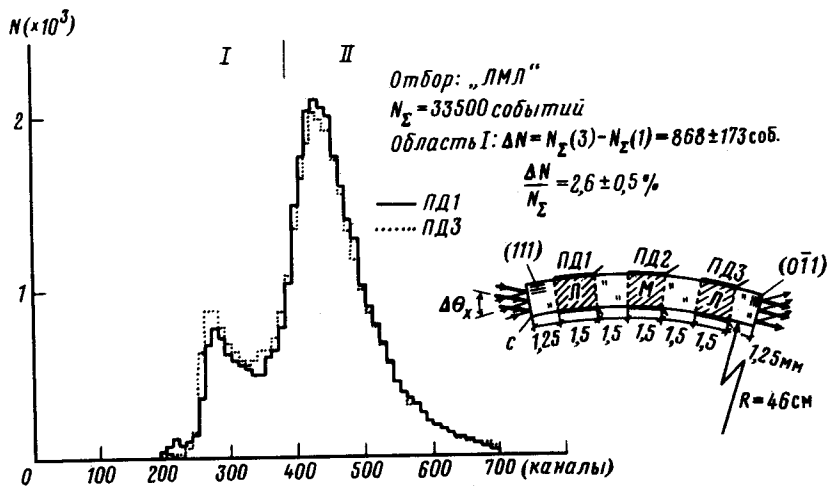
О ВЫПОЛНЕНИИ ПРИНЦИПА ОБРАТИМОСТИ ДЛЯ ПРОЦЕССА "ОБЪЕМНОГО" ЗАХВАТА ЧАСТИЦ В РЕЖИМ КАНАЛИРОВАНИЯ В ИЗОГНУТОМ КРИСТАЛЛЕ

А.В.Андреев, В.В.Баублис, Е.А.Дамаскинский, А.Г.Крившиц,
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.А.Сулимов,
О.И.Сумбаев, В.А.Щегельский

Экспериментально показано, что принцип обратимости выполняется, по крайней мере, для 97% частиц, участвующих в так называемом процессе "объемного" захвата¹ в режим каналирования в изогнутом кристалле.

В предыдущих статьях^{1, 2} нами сообщалось об экспериментальном обнаружении эффекта объемного захвата частиц в режим каналирования в изогнутом кристалле¹ и об одном из следствий эффекта объемного захвата – угловой фокусировке и уменьшении фазового объема для пучка каналировавших частиц².

Процесс захвата частицы в режим каналирования внутри кристалла есть результат уменьшения энергии ее поперечного движения. Поскольку речь идет об изменениях поперечной энергии, а не полной, то к процессу захвата могут приводить не только неупругие процессы, но и упругие. В принципе, при прохождении через кристалл частица участвует во многих взаимодействиях, в результате которых может происходить изменение энергии поперечного движения. Это упругое рассеяние на отдельных атомах^{3, 4} и флуктуациях кристаллического поля, неупругое взаимодействие с электрон-ионной подсистемами кристалла посредством ионизационных процессов, излучения плазмонов и фононов⁵, возможно также квантовое туннелирование через потенциальный барьер, образованный одной из атомных плоскостей и т. д.



Амплитудные спектры в ПД1 (сплошная линия) и в ПД3 (пунктирная линия) для частиц, имеющих малые амплитуды (меньше чем 0,74 от наиболее вероятного значения для хаотической фазы) в ПД2. Отбор событий типа "ЛМЛ" – любая в ПД1, 3 и малая амплитуда в ПД2. ПД1, 2, 3 – поверхностно-барьерные детекторы, С – кристалл кремния

Для конкретизации механизма диссипации поперечной энергии принципиально важно знать, за счет каких процессов – обратимых или необратимых – она происходит. Однако, приведенные ранее экспериментальные результаты^{1, 2} не дают информации о механизме (обра-

тимый или необратимый) диссипации энергии поперечного движения в акте объемного захвата. Даже наблюдаемое уменьшение фазового объема пучка каналирующих частиц ² не может служить подтверждением неупругого и направленного (т. е. необратимого) характера диссипации поперечной энергии в этом процессе, так как данные относятся только к небольшой части частиц пучка — к каналированной фазе.

В данной статье мы приводим дополнительный экспериментальный материал о характере последовательных процессов: захват, каналирование и деканалирование (из опыта ¹), который позволяет получить определенную информацию о механизмах диссипации поперечной энергии в акте объемного захвата.

С особенностями экспериментальной установки можно ознакомиться в работе ¹. Здесь же отметим только, что в опыте использовался пучок протонов с энергией $E_p = 1$ ГэВ и большой угловой расходимостью (прямоугольное распределение с шириной $\Delta\theta_x \approx 44$ мрад). Кристаллическая кремниевая мишень имела постоянный радиус изгиба $R = 46$ см, толщина пластины 0,4 мм, а полная длина 10 мм. Ориентация вырезки пластины была такая, чтобы плоскость (111) совпадала с большой гранью, а торец кристалла — с плоскостью (110).

Основной возможностью проверки принципа обратимости для вышеназванных процессов являлось наличие трех идентичных по своим геометрическим и физическим характеристикам детекторных областей ¹ на одном кристалле, разнесенных на равные расстояния, большие чем длина деканалирования (см. вставку, справа, на рис. 1) ²).

Применительно к рассматриваемому случаю, принцип обратимости должен означать, что если акт захвата (процесс уменьшения энергии поперечного движения) в режим каналирования в объеме кристалла происходит за счет каких-либо обратимых процессов (например, упругое рассеяние), то частица должна вернуться (деканалировать, или, другими словами, увеличить энергию поперечного движения) в первоначальное состояние тем же путем, что в прямом (захват) процессе. При действии необратимых процессов, которые могут самопроизвольно протекать только в одном направлении, частица не должна вернуться в исходное состояние.

В соответствии с вышеизложенным, если мы выделим каналирующие через область второго детектора частицы (например, по величине ионизационных потерь) и сравним их состояние в симметричных первом и третьем детекторах (также через спектры ионизационных потерь), мы должны иметь, при справедливости принципа обратимости, идентичные распределения. На рисунке представлен такой экспериментальный материал, а именно, полные спектры в ПД1 (сплошная линия) и ПД3 (пунктирная линия) частиц, имевших малые (меньше чем 0,74 от наиболее вероятного значения для хаотической фазы) ионизационные потери в области ПД2 (отбор событий типа "любой-малый-любой — ЛМЛ"). Как показывают прежние наши экспериментальные данные ^{1, 2}, отбор по указанному выше условию малых ионизационных потерь является надежным критерием режима каналирования частицы ³). Вид спектра ПД1 свидетельствует, что частицы, каналирующие в области второго детектора, были захвачены в режим каналирования, в основном в области между первым и вторым детекторами (объемный захват) и только малая часть дошла в режиме каналирования из торцевой части кристалла. Из приведенного спектра с ПД3 видно, что он имеет практически такую же форму. Таким образом, из сравнения спектров следует, что скорость процессов захвата и дека-

¹) Поверхностно-барьерные детекторы ПД1, ПД2, ПД3.

²) Легко заметить, что широкое (44 мрад) прямоугольное угловое распределение падающего пучка также является необходимым условием симметризации задачи.

³) Это обусловлено существенным отличием ионизационных потерь для хаотической фазы ($\Delta_{тр}^r = 516 \pm 5$ кэВ — наиболее вероятное значение, $FWHM^r = 143 \pm 1$ кэВ — полуширина распределения) и каналированной фазы ($\Delta_{тр}^c = 271 \pm 25$ кэВ, $FWHM^c = 48 \pm 3$ кэВ), а также относительно высоким энергетическим разрешением использованных детекторов ($\Delta E = 29 \pm 1$ кэВ для $E_a = 5,486$ МэВ).

налирования одинакова и, соответственно, они обусловлены обратимым механизмом. Численный подсчет и сравнение количества частиц в первом и третьем детекторах в области I (малых амплитуд) на рисунке свидетельствует, однако, о не полной тождественности спектров: в ПДЗ осталось каналирующих частиц, несколько больше ($\Delta N/N_{\Sigma} = 2,6 \pm 0,5\%$), чем их было в первом детекторе⁴⁾. Это могло бы быть указанием на небольшую примесь необратимых процессов диссипации энергии поперечного движения (в акте объемного захвата или при движении уже в режиме каналирования — "охлаждение" пучка), однако, мы не можем исключить на этом уровне неучтенной несимметричности самой кристаллической мишени.

Подводя итог, можно заключить, что принцип обратимости выполняется в описанном опыте для 97% частиц, что свидетельствует об обратимом, в основном, механизме захвата частиц в режим каналирования в акте объемного захвата и ограничивает возможную примесь необратимых процессов захвата на уровне $\lesssim 3\%$ ⁵⁾.

Литература

1. Андреев В.А., Баублис В.В., Дамаскинский Е.А., Крившич А.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 340.
2. Андреев В.А., Баублис В.В., Дамаскинский Е.А., Крившич А.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 58.
3. Таратин А.М., Воробьев С.А. ЖТФ, 1985, 55, 1598.
4. Муралев В.А. Тезисы докладов XV Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 27 – 29 мая, 1985 г.) с. 14.
5. Мазур Е.А., Стриханов М.Н. Тезисы докладов XV Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 27 – 29 мая, 1985 г. с5).

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

Поступила в редакцию
11 июня 1986 г.

⁴⁾ $\Delta N/N_{\Sigma} = [N_{\Sigma}^I(3) - N_{\Sigma}^I(1)]/N_{\Sigma}$, где $N_{\Sigma}^I(1)$, $N_{\Sigma}^I(3)$ — суммарное число частиц в пределах области I в спектрах ПД1 и ПД3, соответственно; N_{Σ} — суммарное число частиц в областях I и II (полная площадь спектра).

⁵⁾ Для конкретности, следует также отметить, что все вышесказанное относится к частицам, имеющим во втором детекторе ионизационные потери меньше, чем 0,74 от потерь хаотической фазы. Данным потерям соответствуют состояния поперечного движения с $E_{\perp} \lesssim 14$ эВ, т.е. довольно глубокие уровни (полная глубина ямы ~ 24 эВ).