

3. КАНАЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ

Успехи физики каналирования заряженных частиц в кристаллах стимулировали поиск механизмов, способных обеспечить аналогичное упорядоченно ориентационные движение нейтральных частиц и гамма-квантов в монокристаллах.

Уже предварительные расчеты продемонстрировали возможность реализации ориентационно-канализованного движения нейтральных частиц и квантов, как в совершенных кристаллах, так и в кристаллах с микроканалами произвольно малой ширины (например, в цеолитах). Было показано, что во всех подобных объектах (включая однородную решетку) при каналировании рентгеновских и γ -квантов имеет место модуляция поперечной структуры волны и изменение коэффициента продольного затухания. В кристаллах возможно также каналирование незаряженных частиц (например, нейтронов) как за счет «оптического» фермиевского взаимодействия с ядрами атомов решетки, так и за счет магнитного диполь-дипольного и когерентно-швингеровского механизмов в магнитных и немагнитных кристаллах. Канализование нейтральных атомов с внутренними электромагнитными резонансами может осуществляться за счет индуцированно-дисперсионного упорядочивающего механизма взаимодействия, возникающего при примерном совпадении резонансной частоты с гармоникой частоты продольного движения в периодической решетке.

Среди большого разнообразия известных физических явлений, определяющих конкретные механизмы взаимодействия квантов электромагнитного излучения, нейтронов и нейтральных атомов с атомами кристалла, можно выделить несколько наиболее важных процессов, способных обеспечить появление механизма, «привязывающего» движение частиц или квантов к конкретным кристаллическим плоскостям, осям или их системам. Для коротковолновых квантов основным (и, по-видимому, единственным) является механизм управления их движением за счет использования когерентного рассеяния (с последующей интерференцией) на отдельных центрах, неупорядоченных ансамблях, а также периодической системе кристаллических плоскостей и осей. Такой процесс хорошо известен и широко используется в физике дифракции, причем все количественные характеристики при этом определяются посредством анализа ее фурьеобраза. Взаимодействие нейтронов с атомами естественным образом распадается на рассеяние на ядрах и атомных электронах. Первый круг явлений включает как рассеяние на ядре как едином целом, так и (в особых условиях и при большой энергии) на ядерных резонансах.

Другая совокупность явлений, связанная с взаимодействием нейтрона с атомными электронами и зарядом ядра, сводится к швингеровскому взаимодействию, причина появления которого обусловлена релятивистским эффектом возникновения магнитного поля решетки в системе покоя нейтрона при его пролете в электрическом поле атома. Вследствие наличия у нейтрона собственного магнитного момента появление такого поля приводит в итоге к возникновению достаточно сильного магнитного взаимодействия, способного существенно повлиять на траекторию движения нейтрона.

Кроме взаимодействия с эффективным магнитным полем, связанным с релятивистской трансформацией электрического поля атома, возможно также управление движением нейтрона за счет прямого магнитного диполь-дипольного взаимодействия нейтронного и нескомпенсированного атомного магнитных моментов. Особое значение такое взаимодействие приобретает в упорядоченных магнитных структурах.

Все присущие нейтронатомному взаимодействию процессы свойственны и взаимодействию движущихся нейтральных атомов с решеткой. При этом наличие электронной оболочки существенно изменяет эффективность процесса. Присутствие резонансных уровней в этой оболочке открывает принципиально новый механизм когерентного взаимодействия с периодически расположенными атомами решетки.

Центральным в физике каналирования является вопрос о том, способны ли перечисленные механизмы взаимодействия обеспечить ориентационно каналированное движение нейтральных частиц и квантов в кристаллах. Обычно считается, что явление каналирования заряженных частиц не имеет аналога в случае квантов, проходящих сквозь совершенный кристалл. Более того, считается, что подобный режим транспортировки излучения не имеет места и в значительно более широких, чем межплоскостное пространство, каналах, поперечный размер (ширина) которых a меньше порогового значения.

В связи с казавшейся очевидностью такого заключения все существующие исследования по проблеме физики каналирования нейтральных частиц или квантов ограничивались рассмотрением возможности каналирования в слоистых структурах большого периода a , структурах с плавно изменяющимся показателем преломления и большим периодом a , в системах вакансионных и вакуумных пор диаметром $D > 100 \text{ \AA}$. В системах с такими параметрами особенности режима транспортировки нейтронов и квантов соответствуют обычной макроволновой нейтронной,

рентгеновской и γ -оптике искусственных волноводов, давно используемых для транспортировки ультрахолодных нейтронов, создания фокусирующих и монохроматизирующих систем рентгеновского излучения.

Однако, можно привести некоторые аргументы, указывающие на возможность каналирования и для узких каналов (щелей), возникающих при стремлении a к кристаллическому периоду d . Для правильного и достоверного решения задачи о возможности и механизмах каналирования нейтральных частиц и квантов в кристаллах необходимо использование точных, не усредненных по межплоскостному расстоянию уравнений квантовой механики и электродинамики. Это же требование связано с исследованием зонной структуры энергетического спектра при каналированном движении нейтральных частиц в периодическом поле кристаллических осей и плоскостей.

В связи со спецификой и слабостью (по сравнению с кулоновским каналированием заряженных частиц, для которых характерная высота потенциального барьера или глубина ямы плоскостей и осей составляет десятки эВ) упорядочивающего механизма ориентационного движения для нейтральных частиц понятие каналирования нужно уточнить. Если для заряженных частиц адекватным является классическое описание каналирования с представлением о периодической траектории и амплитудой колебаний, ограниченной шириной канала, то для нейтральных частиц это не так. Даже для сравнительно массивных нейтронов в яме присутствует один уровень (вернее зона) разрешенной энергии, а движение в поперечном направлении является чисто квантовым. При этом за счет малой высоты стенок канала подбарьерные «хвосты» волновой функции простираются на большое расстояние, существенно превышающее ширину ямы. Несмотря на такую особенность движения, оно, несомненно, является каналированным, понимаемым как ориентационное сильносвязанное (т.е. локализованное в окрестности потенциальной ямы) поперечно квантованное и продольно свободное движение.

В настоящее время в связи с большими трудностями в постановке экспериментов отсутствуют программы и последовательное систематическое исследование явления каналирования для нейтральных частиц и квантов. Кроме очевидных проблем, связанных с необходимостью использования малорасходящихся, монохроматичных и интенсивных пучков, это не в последнюю очередь обусловлено отсутствием обобщающего анализа самой задачи каналирования применительно к некулоновскому взаимодействию.

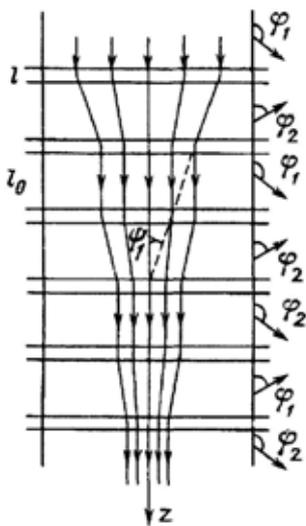


Рис.8. Асимптотическая фокусировка потока частиц многодоменной структурой с чередующимися направлениями намагниченности

К настоящему времени проведены некоторые первые успешные эксперименты по каналированию быстрых нейтронов и жестких γ -квантов, а также мягкого рентгеновского излучения. Была подтверждена возможность каналирования быстрых нейтронов с энергией 2,5 МэВ и жестких квантов с энергией 3 МэВ.

Формирование начального нейтронного пучка и ограничение углового раз мера детектора производилось с помощью двух коллиматоров из нормализованной стали длиной 2 м со сквозным каналом сечением 3×3 мм². Между коллиматорами на гониометрической головке размещался предварительно ориентированный монокристалл Ge в форме цилиндра диаметром 56 мм и высотой 20 мм. Результаты эксперимента по снятию угловой зависимости коэффициента пропускания быстрых нейтронов в приосевом $[1 \bar{1} 1]$ - направлении представлены на **Рис.9**.

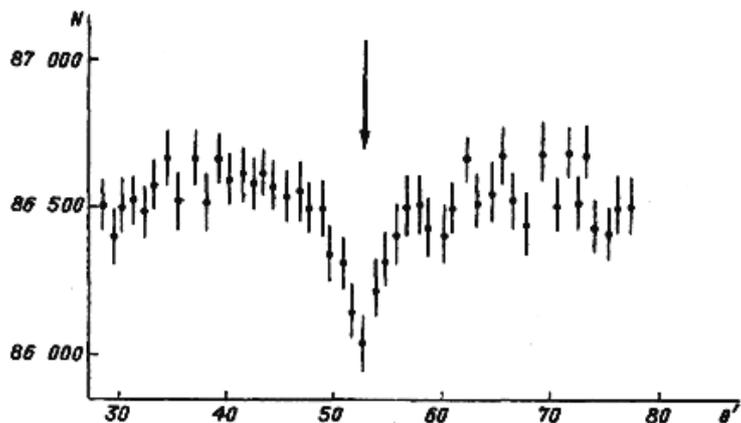
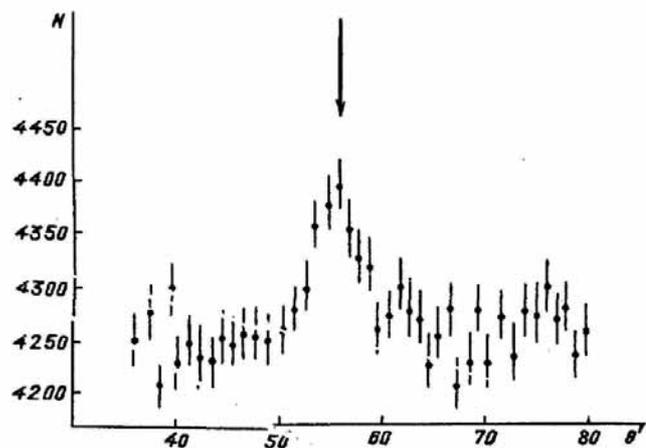


Рис.9. Зависимость скорости счета быстрых нейтронов от угла поворота монокристалла Ge.

На той же установке была предпринята попытка осуществления дифракции гамма-излучения (**Рис. 10**).

Рис.10. Зависимость скорости счета γ -квантов с энергией 3 МэВ в тех же условиях, что на Рис.9 .



Теоретические расчеты и первые эксперименты показали, что, несмотря на явную слабость взаимодействия нейтральных частиц и квантов с атомами упорядочение расположенных плоскостей и осей, существует несколько достаточно эффективных механизмов, способных обеспечить их сильно связанное ориентационное движение типа каналирования или менее связанное типа квазиканалирования.

Типичная ситуация соответствует наличию только одного (редко 2—3) уровней квантового движения как в межплоскостном (осевом) канале, так

и в узком канале шириной в доли или единицы нанометра. При этом область возможной локализации частицы (кванта) в поперечном направлении существенно превосходит размер канала, что ведет к небольшим количественным отличиям итоговых характеристик транспортировки потоков при каналировании и в режиме неориентационного движения.

В связи с этим существенно возрастают (по сравнению со случаем заряженных частиц) требования к коллимации исходного пучка и, главное, к надежной статистике результатов при измерении эффекта. Вместе с тем можно указать на ряд случаев, когда малое отличие в поперечной структуре волновой функции (при каналировании и без него) может приводить к большому итоговому различию (например, при каналировании резонансных и медленных нейтронов в многоатомной решетке с чередующимися сильно и слабопоглощающими нейтроны ядрами). Кроме того, сама специфика каналированного движения позволяет ставить эксперименты в новой, отличной от традиционной геометрии. В качестве примера можно указать на возможность идентификации каналирования квантов по дифракционному максимуму в направлении, отличном от обычного брэгговского.

Для дальнейшего исследования эффектов каналирования и развития приложений целесообразна постановка экспериментов по плоскостному каналированию нейтронов как при больших энергиях за счет когерентношвингеровского механизма, так и при малых за счет "оптического" фермиевского взаимодействия. В качестве наиболее перспективных систем поидуцированнодисперсионному каналированию можно указать на кристаллы цеолитов, для некоторых из которых имеющиеся периодически «насаженные» на микроканалы микрополости могут выполнять роль формирующей траекторию периодического воздействия. В таких структурах, очевидно, возможно каналирование атомов водорода.

Выполнение всего комплекса оптимизирующих условий вероятно позволит выйти на уровень практического использования эффектов каналирования нейтральных частиц и квантов как для решения обратных задач структурного анализа, так и для создания систем фокусировки, транспортировки и управления потоками нейтрального излучения, включая поворот при изгибе кристалла на малый угол.