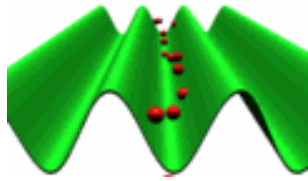


1. КАНАЛИРОВАНИЕ И «ЭФФЕКТ ТЕНЕЙ»



Когда заряженные частицы падают на слабоупорядоченный твердый объект, их рассеяние происходит более или менее хаотично, поскольку они сталкиваются с отдельными атомами. Однако, когда мишень представляет собой кристалл и узкий сфокусированный пучок частиц падает на него под определенным углом, индивидуальные акты рассеяния приводят к кооперативным эффектам, т. е. движение частиц направляется (канализуется) атомными цепочками или плоскостями. Такое каналирование позволяет частицам проникать в кристалл намного глубже, чем в других случаях;

излучение, испускаемое при этом, имеет особые характеристики и резко ускоряет или подавляет реакции между этими частицами и ядрами в кристалле.

Заряженные частицы, движущиеся вдоль плоскостей симметрии кристалла, ведут себя необычно: они взаимодействуют с атомными плоскостями или рядами, а не с отдельными атомами.

Каналирование заряженных частиц в кристаллах - движение частиц вдоль «каналов», образованных параллельными друг другу рядами атомов. При этом частицы испытывают скользящие столкновения (импульс почти не меняется) с рядами атомов, удерживающих их в этих «каналах» (Рис. 1).

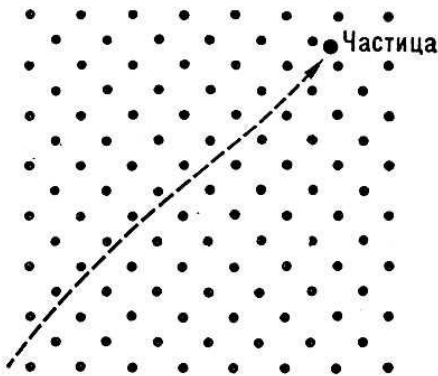


Рис. 1. Каналирование заряженной частицы в кристалле

Каналирование приводит к резкому увеличению длины пробега частиц в кристалле при движении вдоль основных кристаллографических осей и плоскостей. При этом частица может длительное время двигаться в канале - пространстве между рядами атомов (струнами), избегая приближения к отдельным атомам на малые расстояния, а поэтому теряя меньшую энергию и редко сталкиваясь с частицами кристалла.

Если траектория частицы заключена между двумя атомными плоскостями, то говорят о плоскостном каналировании, в отличие

от аксиального каналирования, при котором частица движется между соседними рядами атомов.

Каналирование заряженных частиц было предсказано американскими физиками М.Т. Робинсоном и О.С. Оуэном в 1961 и обнаружено в 1963-65 несколькими группами экспериментаторов.

По отношению к заряженной частице, движущейся в кристалле вдоль одной из его осей симметрии, атомы в кристалле расположены приблизительно так, как бусинки на натянутой нитке. Столкновения с атомами данной цепочки сильно коррелированы: если частица проходит близко к одному из атомов, то она пройдет также близко и к соседним атомам той же цепочки. В результате цепочка атомов действует как единое целое, отклоняя заряженную частицу так, словно дискретные заряды атомов однородно распределены по ее длине. Аналогично атомные плоскости в кристалле могут каналировать частицы, действуя на них подобно плоским ограничивающим поверхностям.

Канализуемые положительно заряженные частицы, перед тем как потерять свою энергию, проходят в кристалле в четыре-пять раз большее расстояние, чем такие же неканализуемые. Кроме того, селективно подавляются взаимодействия некоторых типов, например центральные взаимодействия с ядрами атомов в кристалле-мишени. Силы отталкивания со стороны ядер удерживают положительно заряженные частицы в основном в пространстве между атомными цепочками или плоскостями, что снижает вероятность таких реакций. Для отрицательно заряженных частиц картина почти противоположная: они движутся преимущественно вдоль рядов положительно заряженных ядер, и поэтому вероятность реакций при центральных взаимодействиях может возрасти приблизительно в шесть раз.

Каналирование тяжёлых частиц (протонов и ионов) наблюдается при энергиях больше нескольких кэВ, что соответствует длине волны де Бройля, малой по сравнению с постоянной кристаллической решётки. Каналирование заряженных частиц в этом случае может быть описано законами классической механики. Для каналирования заряженных частиц необходимо, чтобы угол, образуемый скоростью частицы и осью атомного ряда (или плоскостью для плоскостного каналирования), не превышал некоторого критического значения $Y_{кр}$. Угол $Y_{кр}$ тем больше, чем больше атомные номера частицы и атома кристалла, чем меньше энергия частицы и чем меньше расстояние между атомами в ряду атомов, вдоль которого происходит каналирование заряженных частиц. Для аксиального каналирования в некоторых направлениях $Y_{кр} = 0,1 - 5^\circ$ (для плоскостного каналирования в несколько раз меньше).

Траектория каналированных частиц проходит дальше от ядер атомов кристаллической решётки, чем траектория неканалированных частиц. Это приводит к важным следствиям: 1) длина пробега частиц в канале значительно больше, чем длина пробега неканалированных частиц, т.к. электронная плотность в каналах меньше, чем в среднем в кристалле. Увеличение длины пробега ионов при каналировании заряженных частиц используется при ионном легировании полупроводников. 2) Поскольку каналированные частицы движутся сравнительно далеко от ядер и близких к нему электронных оболочек (K и L оболочек), то вероятность ядерных реакций и возбуждения рентгеновского излучения под действием каналированных частиц намного меньше.

Хотя влияние каналирования на глубину проникновения и взаимодействие между влетевшей частицей и мишенью очень велико, его воздействие на излучение, испускаемое такой частицей, еще сильнее. Частицы, движущиеся в аморфном твердом теле, по мере своего замедления порождают тормозное излучение с широким спектром, испуская фотоны всех энергий вплоть до энергии самой частицы. В то же время каналируемые частицы испускают интенсивные пучки фотонов определенных энергий. В некоторых случаях появляются резкие линии испускания, весьма сходные с такими линиями у электронно-возбужденных атомов.

Частицы, движущиеся в каналах, могут выходить из канала в результате рассеяния на дефектах в кристалле, что используется для изучения дефектов. С эффектом каналирования заряженных частиц в тесно связан эффект теней.

Эффект теней - возникновение характерных минимумов интенсивности (теней) в угловом распределении частиц, вылетающих из узлов решётки монокристалла. Он наблюдается для положительно заряженных тяжёлых частиц (протонов, дейтронов, более тяжёлых ионов). Тени образуются в направлениях кристаллографических осей и плоскостей. Появление тени в направлении кристаллографической оси (осевая тень) обусловлено отклонением частиц, первоначально вылетевших в направлении этой оси, внутриатомным электрическим полем ближайших к излучающему узлу атомов, расположенных в той же цепочке (**Рис. 2**). Распределение относительной интенсивности частиц u в области тени изображено на **Рис. 3**. Угловые размеры тени определяются соотношением:

$$x_0 \approx \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{El}}$$

где x_0 - полуширина тени, eZ_1 и E — заряд и энергия движущейся частицы, eZ_2 — заряд ядра атома кристалла, l — расстояние между соседними атомами цепочки. Интенсивность g потока частиц в центре тени для совершенного кристалла (без дефектов) примерно в 100 раз меньше, чем на периферии.

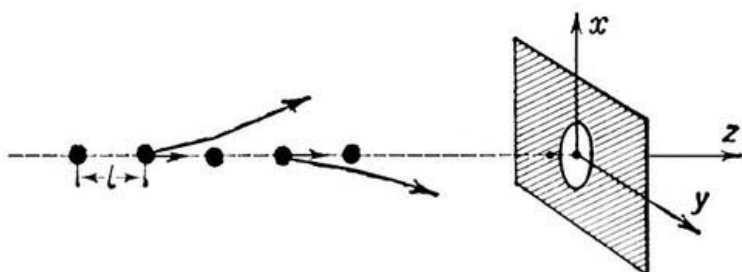


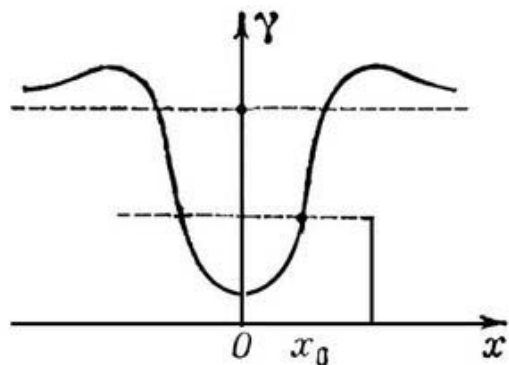
Рис. 2. Происхождение эффекта теней

Т. э. был обнаружен в 1964 независимо А. Ф. Тулиновым (СССР) и Б. Домеем и К. Бьёрквистом (Швеция), причём частицы, в пучке которых наблюдались тени, в этих

работах имели различное происхождение. В экспериментах Тулинова это были продукты ядерных реакций на ядрах кристаллической мишени под действием ускоренных частиц. Домей и Бьёрквист вводили α -радиоактивные ядра в узлы кристаллической решётки (методом ионной имплантации) и наблюдали тени в угловом распределении вылетающих из кристалла α -частиц. Первый метод оказался

более универсальным, и практически все последующие эксперименты проводились по его схеме. В частности, с помощью этого метода удалось наблюдать плоскостные тени, то есть области пониженной интенсивности частиц в направлении кристаллографических плоскостей, имеющие форму прямых линий.

Рис. 3. Угловое распределение интенсивности потока вылетающих из кристалла частиц при эффекте теней.



При регистрации плоскостных теней в качестве детектора часто используют ядерные фотографические эмульсии, так

как с их помощью можно регистрировать теньевую картину в большом телесном угле. На эмульсии возникает сложная теньевая картина кристалла, называемая ионограммой (**Рис. 4**).

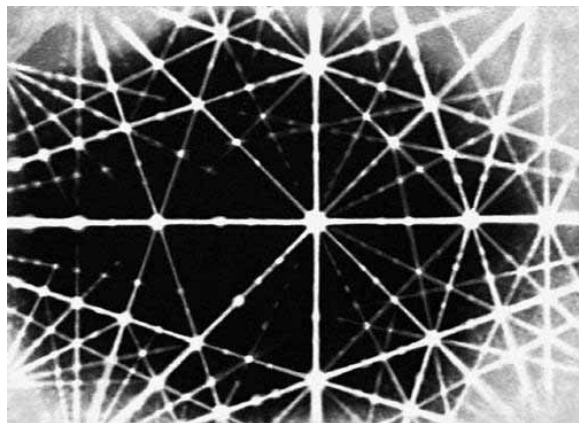


Рис. 4. Ионограмма кристалла.

Расположение пятен и линий на ионограмме зависит от структуры кристалла и геометрических условий опыта. Распределение интенсивности в пределах одной тени (осевой или плоскостной) определяется многими факторами (состав и структура кристалла, сорт и энергия движущихся частиц, температура кристалла, количество дефектов в кристалле). Пятна и линии на ионограмме по своей природе принципиально отличны от пятен и линий, получаемых при изучении кристалла дифракционными методами. Из-за малой величины длины волны де Бройля

для тяжёлых частиц дифракционные явления на образование теней практически не влияют.

Эффект теней используется в ядерной физике и физике твёрдого тела. На его базе разработан метод измерения времени протекания ядерных реакций в диапазоне значений 10^{-6} - 10^{-18} сек. Информация о величине t извлекается из формы теней в угловых распределениях заряженных продуктов ядерных реакций, поскольку эта форма определяется смещением составного ядра за время его жизни из узла решётки. В физике твёрдого тела эффект теней используется для исследования структуры кристалла, распределения примесных атомов и дефектов. Особенно эффективными методы, основанные на Т. э., оказываются при изучении тонких монокристаллических слоев вещества ($10-1000\text{Å}$).

Эффект теней относится к группе ориентационных явлений, возникающих при взаимодействии частиц с кристаллами. Другое ориентационное явление - каналирование заряженных частиц.

Аналогично, но чуть более сложно, строится и трехмерная проекция кристаллической решетки. Если плоскую проекцию можно представить себе как тень, отбрасываемую на экране решеткой, помещенной в параллельный пучок лучей, то трехмерная проекция соответствует тени от решетки, помещенной в расходящийся пучок лучей от точечного излучателя, находящегося на конечном расстоянии. Частицы, расположенные близко к излучателю дадут на экране редкую сетку крупных темных пятен, а удаленные слои - частые, но мелкие тени. Нас будут интересовать два случая:

- 1) проекция тонкого слоя (среза) кристалла из точки вне этого слоя;
- 2) проекция всего кристалла из узла решетки.

Эти две проекции дают яркую иллюстрацию двум физическим эффектам: каналированию и эффекту теней.

Эффект теней - это блокировка определенных направлений вылета частиц, испущенных (или рассеянных) узлом решетки. Ближайшие к излучателю атомы отбрасывают тени, приводя к гашению интенсивности излучения в направлениях основных кристаллографических осей и плоскостей. Чем больше характерное расстояние между каналирующей частицей и ближайшими атомами кристалла, тем меньше электронная плотность вдоль траектории движения частицы и тем меньше потери энергии на торможение в электронном газе. Чем меньше это расстояние, тем больше вероятность деканалирования - сильного взаимодействия частицы с отдельным атомом решетки, приводящего к рассеянию частицы на большие углы и выходу из канала.

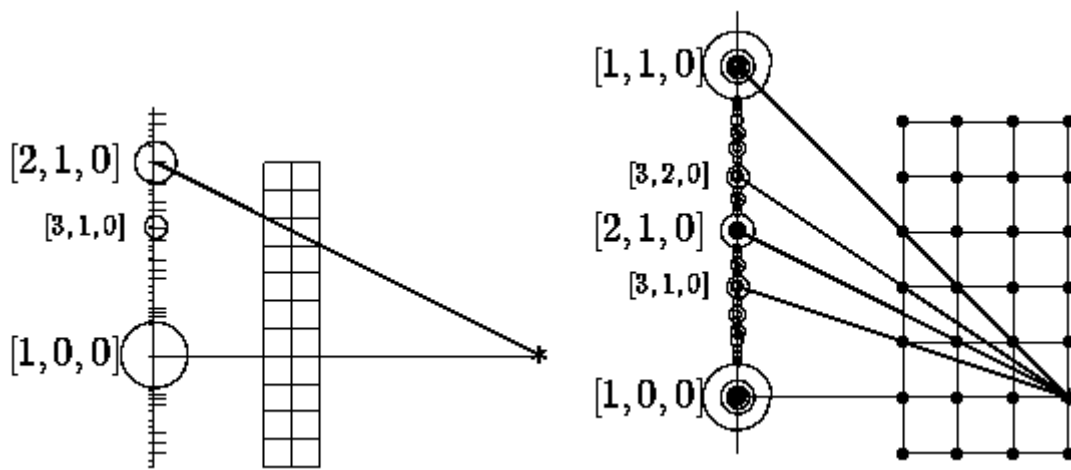


Рис.5. а) Каналограмма (тень от тонкого среза кристалла): штрихи на экране - тени от частиц кристалла: длинные - от 3 слоев; короткие - от соседних. Окружности - просветы в основных направлениях. б) Проекция из узла решетки (протонограмма, эффект теней). Окружности - тени от ближайших к узлу атомов.

Для сравнения на качественном уровне условий движения частицы в различных направлениях в кристалле посмотрим трехмерную проекцию тонкого среза кристалла - каналогамму. На **Рис.11** показано, как получается такая проекция для слоя простой кубической решетки при проектировании вдоль ребра куба. На экране виден интересный рисунок из светлых пятен и полос, характеризующих оси и плоскости возможного каналирования частиц в кристалле.

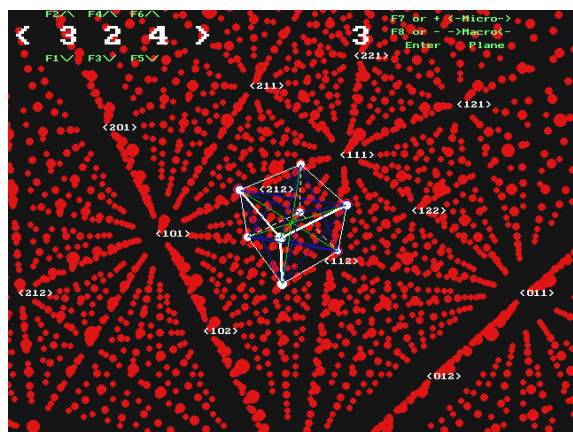


Рис.6. Трехмерное изображение кристалла - каналогамма. Проекция тонкого среза простой кубической решетки вдоль направления $[3,2,4]$.

При этом в центр экрана куб будет проектироваться вдоль одного из ребер, т.е. в направлении $[1,0,0]$, а при удалении от центра куб будет виден под другими углами - возникают направления, близкие к главному. На **Рис.** для примера показано направление $[2,1,0]$.

Изучение тени среза кристалла, что наиболее прозрачными

для большинства кристаллов являются направления, характеризуемые малыми индексами Миллера ($[1,0,0]$, $[1,1,0]$, $[1,1,1]$, $[2,1,0]$ и т.п. и соответствующие плоскости). При движении в этих направлениях просвет между атомами кристалла сравнительно большой - равный или чуть меньший, чем расстояние между атомами в ячейке. В других же направлениях видна частая сетка атомов кристалла, просветы в которой составляют малые доли размера ячейки. Движение в таких направлениях сходно с движением в аморфной среде. При рассеянии быстрой частицы на атоме кристалла окружающие атомы блокируют для рассеянной частицы определенные направления вылета, создавая тени вдоль основных кристаллографических осей. С математической точки зрения для описания этих процессов требуется построить стереометрическую проекцию кристалла из узла решетки. Получающаяся проекция простой кубической решетки кристалла показана на **Рис.7**.

Явление каналирования и эффект теней, в некотором смысле, противоположны: первый приводит к повышению интенсивности выходящего излучения вдоль основных кристаллографических направлений кристалла, а второй, наоборот, к уменьшению.

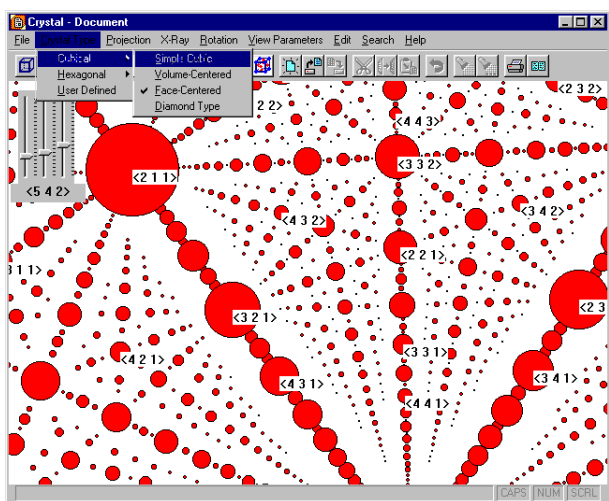


Рис. 7. Проекция кристалла с кубической гранцентрированной решеткой из узла (протонограмма, эффект теней).

В 1976 году Э.Н.Цыгановым была теоретически предсказана возможность отклонения траекторий заряженных частиц изогнутыми монокристаллами. В этой работе утверждалось, что траектории частиц, захваченных в режим каналирования в кристалле, будут следовать за направлением изогнутых кристаллографических плоскостей вплоть до некоторого критического радиуса, который зависит от массы и скорости частицы, ее заряда и от интенсивности межатомного электрического поля кристалла. При каналировании реализуется режим

устойчивого движения, в который могут захватываться положительно заряженные частицы, вошедшие в кристалл под углом относительно кристаллографических осей или плоскостей меньшим некоторого критического значения. Критический угол характеризует предельную поперечную кинетическую энергию частицы и определяет условие ее захвата в процесс каналирования.

В 1979 это предположение было подтверждено экспериментально. Следующим шагом было доказательство возможности вывода пучка из ускорителя с помощью изогнутого монокристалла. В 1984 году при помощи кристалла удалось вывести из ускорителя ОИЯИ пучок протонов с энергией 8 ГэВ. Это было новое слово в науке, сказанное вопреки многим скептикам. Трудно было представить, что изогнутый монокристалл может выполнять функцию отклоняющего магнита. В настоящее время изогнутые монокристаллы используются в мире на целом ряде современных ускорителей для вывода пучков высоких энергий.