

**54-я Международная Тулиновская конференция
по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами**



**Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова,
27 - 29 мая, 2025**

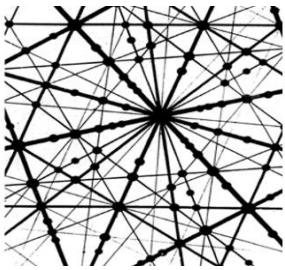
**Квазиканалирование: не финитное периодическое движение частиц
вдоль атомных плоскостей в кристалле**

**Н.П. Калашников, А.С. Ольчак
НИЯУ МИФИ, Москва, Россия**

e-mail: kalash@mephi.ru

e-mail: asolchak@mephi.ru

Этот доклад, заявленный в программе на 10:00 28 мая, к сожалению, не был очно представлен на конференции, но не по вине авторов, а из-за серьезной аварии (повреждение кабеля связи), в результате которой в нашем университете НИЯУ МИФИ 28 и 29 мая не работали почтовые сервера и была отключена любая (сетевая, телефонная и т.п.) связь с внешним миром. Авторы приносят извинения организаторам и участникам конференции.

A diagram of a crystal lattice is located in the top left corner. It shows a network of black lines representing atomic planes, with a central point from which many lines radiate outwards, forming a star-like pattern.

Квази-каналирование: не финитное периодическое движение частиц вдоль атомных плоскостей в кристалле



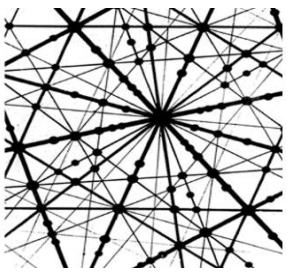
Движение быстрой заряженной частицы вдоль плотноупакованных атомных плоскостей в кристалле, хорошо описывается в модели периодического усредненного потенциала, складывающегося из потенциалов отдельных атомных плоскостей.

Особый интерес представляет движение частиц с поперечными энергиями $\varepsilon \sim eU_0$, близкими к высоте потенциального барьера, разделяющего плоскостные потенциальные каналы. Для таких состояний характерны:

- возможность перехода частиц из одного канала в другой и
- зонная квантовая структура разрешенных значений поперечной энергии движения,

Как будет показано, основные характеристики движения в около-барьерных (квази-канализованных) состояниях можно уловить и адекватно описать, не прибегая к численным квантово-механическим расчетам.

Плоскостное каналирование в сопутствующей системе отсчета – «одномерный релятивистский атом»



Движение заряженной частицы в плоскостном канале финитно. Энергетический спектр такого движения дискретен, а энергии уровней поперечного движения ε_n можно рассчитать, решая релятивистское одномерное уравнение Шредингера:

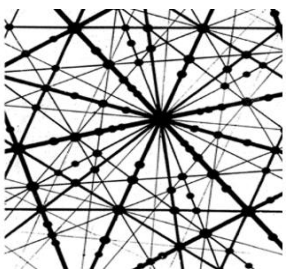
$$d^2\Psi/dx^2 = 2E/\hbar^2 c^2 (\varepsilon_n - U(x)) \Psi,$$

При достаточно высоких релятивистских энергиях канализованной частицы $E \gg mc^2$, допустимые энергии можно определить с помощью правила квантования Бора-

Зоммерфельда: $\oint p(x) dx = 2\pi\hbar c(n+1/2),$

$$\text{где } p(x) = (2E(\varepsilon_n - U(x)))^{1/2} ; n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Общее число связанных канализованных состояний в усредненном потенциале с эффективными глубиной U_0 и шириной a не превышает $N \sim (EU_0)^{1/2} a / \hbar c,$



Плоскостное каналирование в сопутствующей системе отсчета – Околобарьерные состояния.



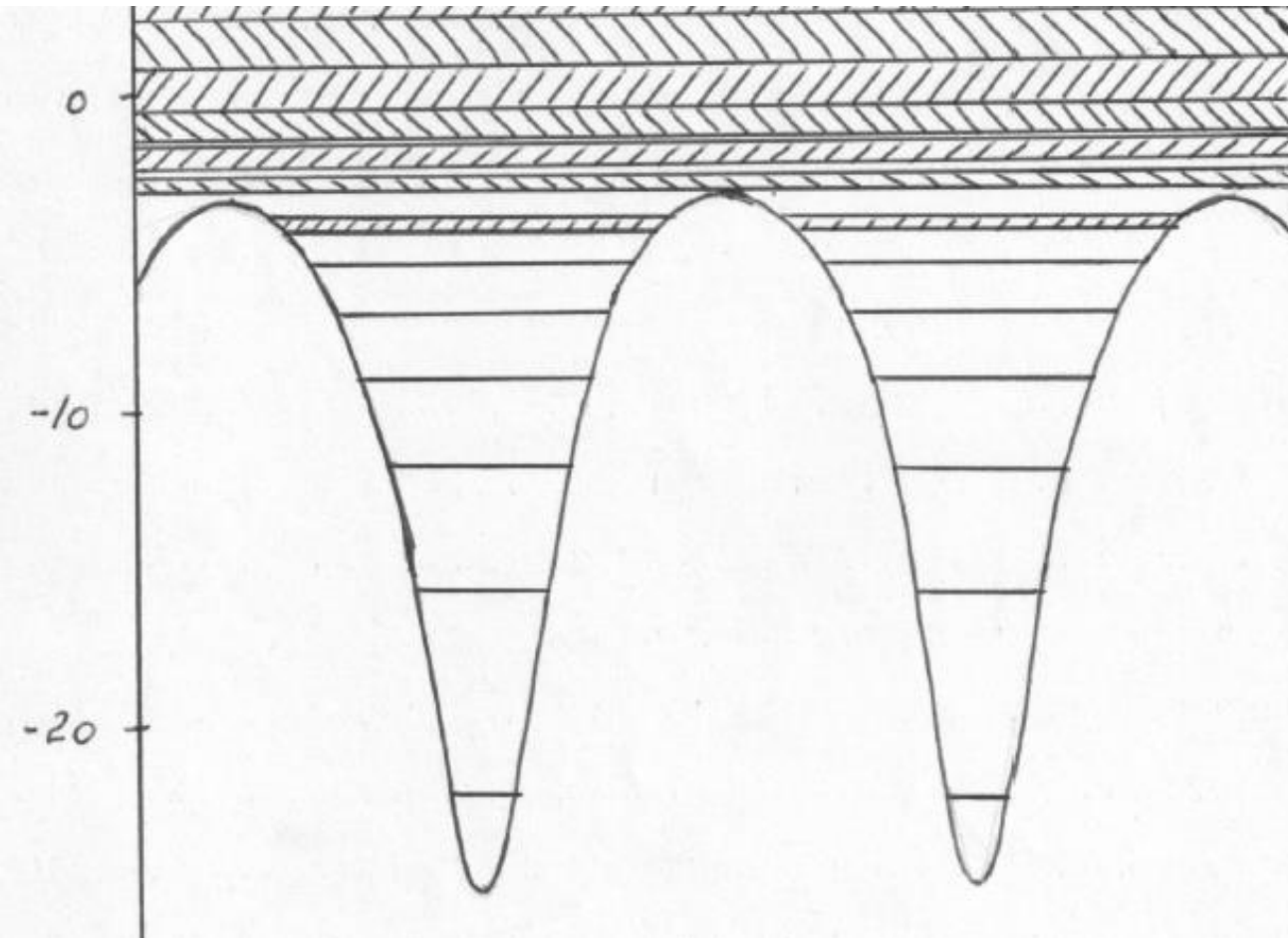
Для околобарьерных состояний, необходимо учитывать потенциалы не одного канала, а сразу всей периодической системы плоскостных каналов. :

$$d^2\Psi/dx^2 = 2E/\hbar^2 c^2 (\varepsilon_n - U_{nep}(x)) \Psi, \quad \text{где } U_{nep}(x) = \sum_n U(x - na)$$

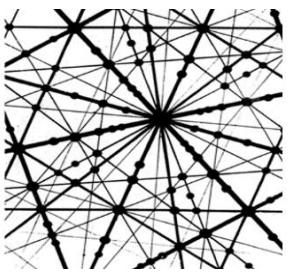
Над-барьерное движение частиц под малыми углами к атомным плоскостям в кристалле - это одномерный аналог движения электронов в периодической твердотельной системе со всеми вытекающими следствиями. В частности, можно ждать образования зонной структуры разрешенных состояний движения, где зоны допустимых энергий разделяются зонами энергий запрещенных

Плоскостное каналирование в сопутствующей системе отсчета – «одномерный релятивистский атом»

Пример квантового расчета спектра энергетических состояний для электронов с энергией 56 МэВ в периодическом потенциале плоскостных каналов (110) в монокристалле кремния. с учетом $(EU_0)^{1/2}a / \hbar c \sim N = 6$



К сожалению, расчет квантовых состояний с помощью релятивистского уравнения Шредингера даже с простейшими модельными потенциалами возможен только численно. Однако, основные характеристики движения и излучения в околосбарьерных состояниях можно уловить, рассмотрев его в классической модели. . :



Около-барьерное движение при плоскостном каналировании»



Расчет квантовых состояний с помощью релятивистского уравнения Шредингера даже с простейшими модельными потенциалами возможен только численно. Однако, важные особенности движения частиц в около-барьерных состояниях можно уловить и описать, не прибегая к квантово-механическим расчетам.

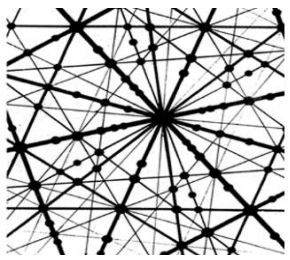
Сравним две классические траектории (наблюдаемые в ЛСО) для поперечных энергий чуть меньше высоты барьера $\varepsilon_x = U_0 - 0$ и чуть больше высоты барьера $\varepsilon_x = U_0 + 0$. Для определенности, рассмотрим периодический потенциал, составленный из параболических каналов (2).. . :

$$U(x) = 4eU_0(x/a - n)^2$$

на интервале $(n - 1/2)a < x < (n + 1/2)a$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

Этот потенциал чень похож на потенциал, рассчитанный в приближении Мольер и использованный в численном квантовом расчете.

Около-барьерное движение при плоскостном каналировании»



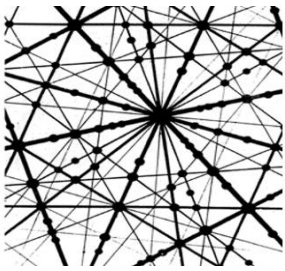
Сравним две классические траектории (наблюдаемые в ЛСО):



1. для поперечных энергий чуть меньше высоты барьера $\varepsilon_x = U_0 - 0$
траектория движения = гармоническая функция с амплитудой $x_0 = a_x / 2$. и длиной периода равной $\lambda = \pi a_x (E/2U_0)^{1/2}$

2. для энергий чуть больше высоты барьера $\varepsilon_x = U_0 + 0$: в точках над барьерами траектория частицы переходит в соседний канал, гладко стыкуясь с предшествующей половиной периода. и далее через каждые полпериода синусоиды такие переходы повторяются .

Около-барьерное движение при плоскостном каналировании»



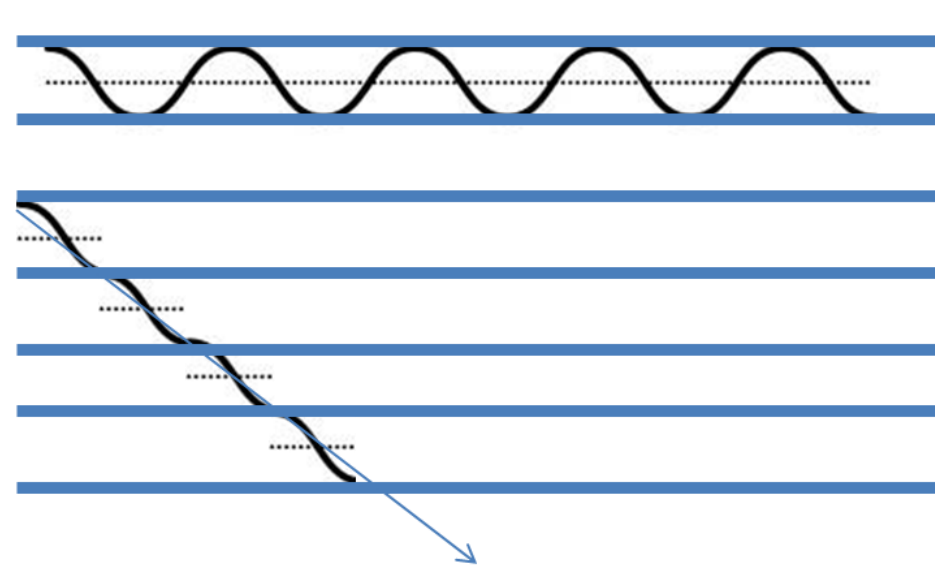
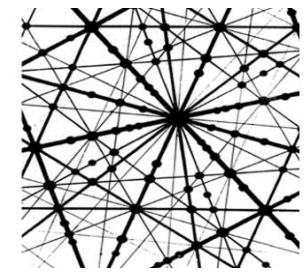
Над-барьерная траектория остается периодической, но перестает быть гармонической и ее основные параметры меняются скачком.



А именно:

1. Длина укладывающегося в один канал периода траектории *сокращается вдвое* по сравнению с длиной периода траектории под-барьерной,
2. Частота отклонений частицы от среднего направления движения становится в 2 раза больше, равно как и характерные частоты электромагнитного излучения, испускаемого частицей.
3. Среднее направление смещения частицы отклоняется от направления каналов на небольшой, но конечный угол $\beta \approx \tan \beta = a_x / \lambda = (2/\pi) (2U_o / E)^{1/2} = 2\theta_L / \pi$
Угол β невелик, но сравним с критическим углом каналирования θ_L

Около-барьерное движение при плоскостном каналировании»



4. Для самого низкого над-барьерного состояния $\varepsilon_x = U_0 + 0$ амплитуда отклонений частицы от среднего направления движения составляет $\sim 0,1a_x$, что в ~ 5 раз меньше амплитуды колебаний в самом высоком под-барьерном состоянии $\varepsilon_x = U_0 - 0$. Это должно сильно сказываться на интенсивности электро-магнитного излучения, испускаемого частицей

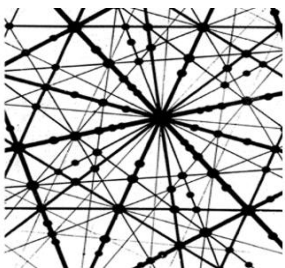
5. Амплитуда отклонений от среднего направления движения еще более снижается с ростом ε_x , а угол отклонения среднего направления смещения частицы β от оси OZ с ростом ε_x увеличивается: $\beta(\varepsilon_x) \approx a_x/\lambda = (2/\pi)(2(\varepsilon_x + U_0)/E)^{1/2}$.

3. Частоты и интенсивность электромагнитного излучения, испускаемого частицей в над-барьерных состояниях, с ростом ε_x падают_L

Квази-каналирование: не финитное периодическое движение частиц вдоль атомных плоскостей в кристалле

Выводы:

- при переходе частицы из под-барьерного состояния с поперечной энергией $\varepsilon < eU_0$, в над-барьерное с энергией $\varepsilon > eU_0$, характеристики движения и параметры сопровождающего его электромагнитного излучения меняются скачком:
- Среднее направление смещения частицы перестает совпадать с направлением каналов и отклоняется от него на угол, близкий по величине к критическим углу каналирования Линдхарда
- Частота отклонений частицы от среднего направления движения скачком удваивается, как и частоты сопровождающего движение электромагнитного излучения , , .
- Амплитуда отклонений частицы от среднего направления движения скачком падает в несколько раз, что ведет к снижению интенсивности электромагнитного излучения, испускаемого частицей.
- С дальнейшим ростом поперечной энергии амплитуда колебаний все более снижается, частоты излучения, испускаемого частицей, растут, а его интенсивность падает.



**52-я Международная Тулиновская конференция
по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами**



**Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова,
30 мая – 1 июня 2023**

Благодарим за внимание!

e-mail: kalash@mephi.ru

e-mail: asolchak@mephi.ru