

Лекция 1

Экспериментально наблюдаемые квантовые эффекты и топологические эффекты в кристаллах и наноструктурах

Содержание

Сверхпроводимость. Отсутствие потерь энергии и электрического сопротивления при протекании электрического тока в сверхпроводнике. Эффект Мейснера. Эффекты Джозефсона.

Ферромагнетизм. Остаточная намагниченность и коэрцитивная сила. Антиферромагнетизм и другие магнитоупорядоченные состояния.

Квантовые осцилляционные эффекты в металлах и полупроводниках. Эффект де Гааза = ван Альфена. Эффект Шубникова — де Гааза.

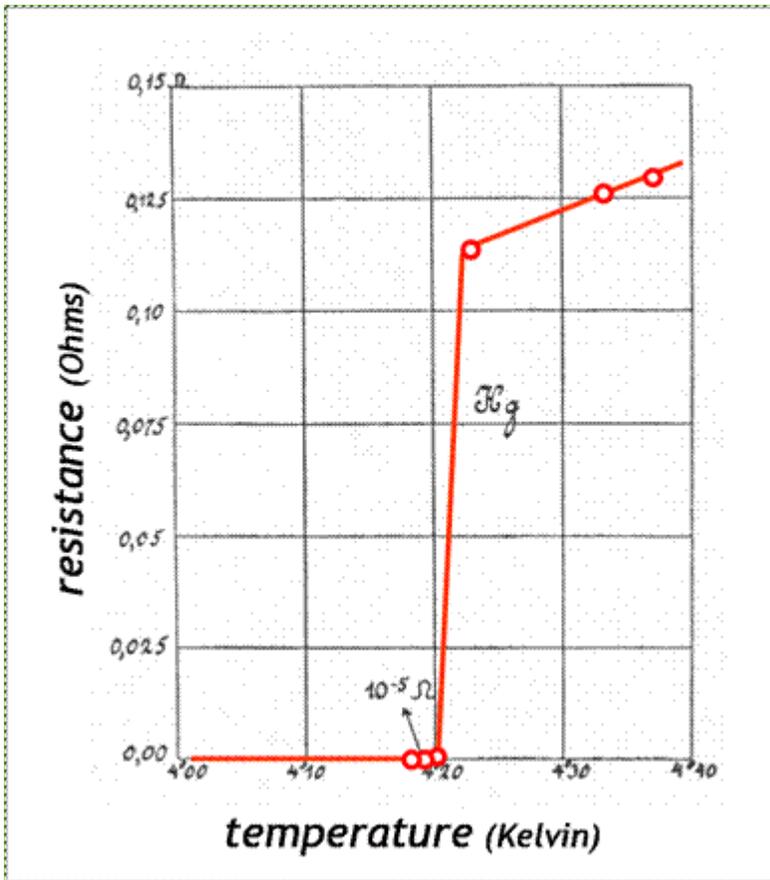
Аномальный эффект Холла. Квантовый эффект Холла. Квантование холловской электропроводности в двумерных структурах. Квантование электропроводности одномерных металлов.

Спиновый эффект Холла. Квантовый спиновый эффект холла. Двумерные топологические изоляторы. Магнитный эффект Ааронова-Бома. Псевдо-эффект Ааронова-Бома.

Сверхпроводимость.

Отсутствие потерь энергии и электрического сопротивления при протекании электрического тока в сверхпроводнике

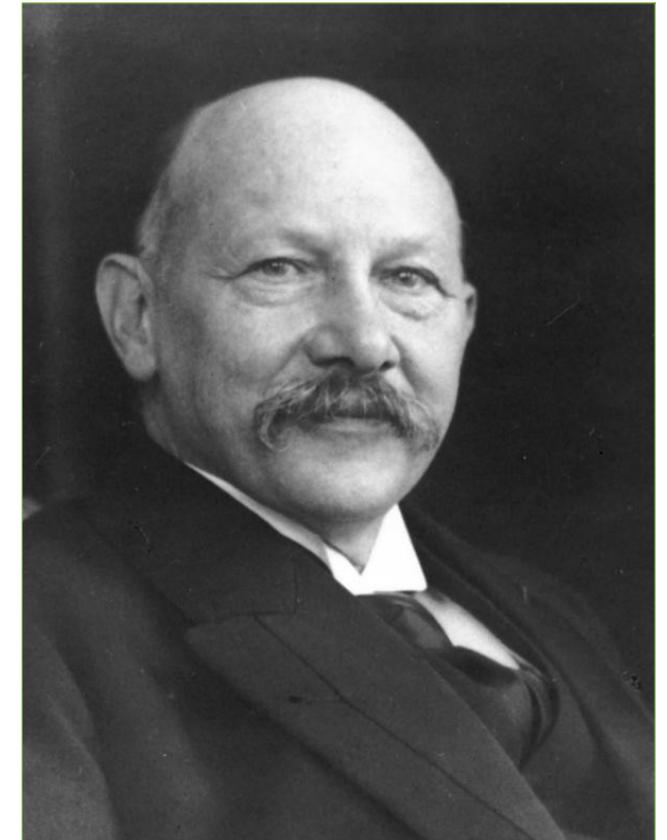
В 1908 году впервые сумел получить жидкий гелий и сумел достичь рекордно низкой на тот момент температуры 0,9 К,



В 1911 году Каммерлинг-Оннес впервые наблюдал резкое падение электрического сопротивления ртути при температуре ниже 4,1 К. Это явление получило название сверхпроводимости. В 1913 году обнаружил разрушение сверхпроводимости сильными магнитными полями и токами.

Хейке Кáмерлинг-Óннес (нидерл. Heike Kamerlingh Onnes; 21 сентября 1853, Гронинген — 21 февраля 1926,

Нобелевская премия по физике (1913)



Сверхпроводимость.

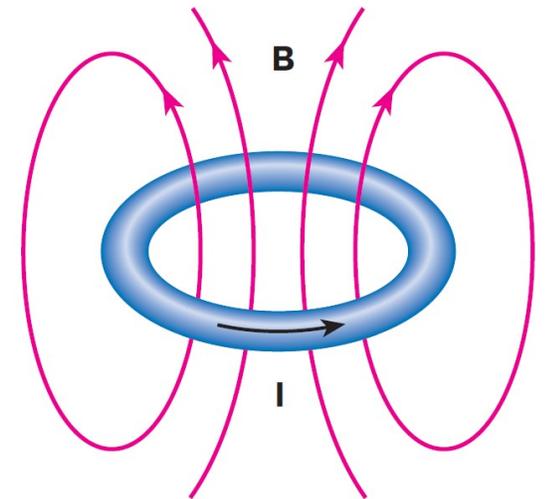
Два электрона с противоположными спинами и направлениями движения объединяются в пару, называемую куперовской. Эти пары обладают нулевым суммарным спином и поэтому подчиняются статистике Бозе–Эйнштейна. При $T < T_c$, то все частицы находятся в основном состоянии с энергией E , отделенном от возбужденного состояния энергетическим барьером величиной 2Δ (по Δ на каждый электрон в паре).

Все частицы описываются единой волновой функцией.

При $T < T_c$ электрический ток переносится куперовскими парами, то есть элементарными носителями тока с зарядом $2e$ (e – заряд электрона).

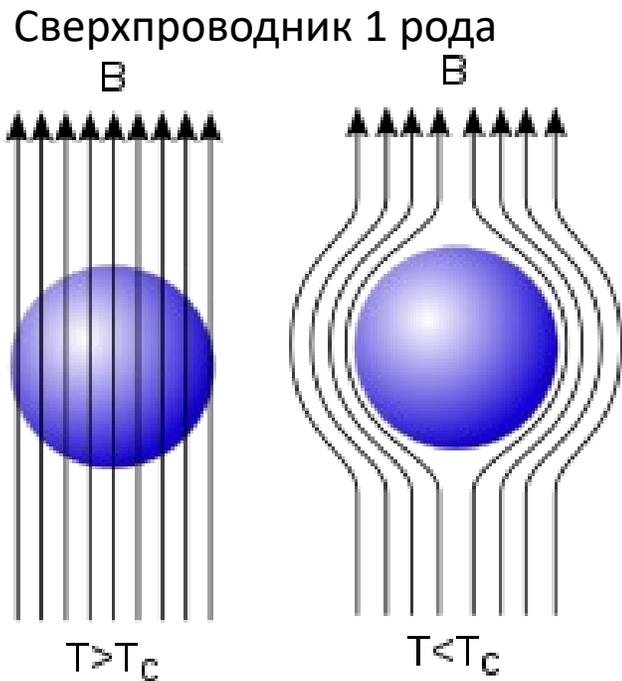
Незатухающий ток в сверхпроводящем кольце и создаваемое им магнитное поле (не могут иметь произвольную величину, они квантуются так, что магнитный поток, пронизывающий кольцо, принимает значения, кратные элементарному кванту потока $\Phi_0 = h/(2e) = 2,07 \times 10^{-15}$ Вб (h – постоянная Планка).

В отличие от электронов в атомах и других микрочастиц, поведение которых описывается квантовой теорией, сверхпроводимость – макроскопическое квантовое явление.

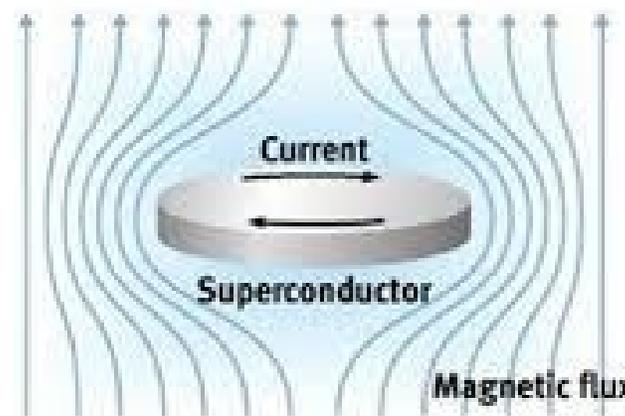


Эффект Мейснера

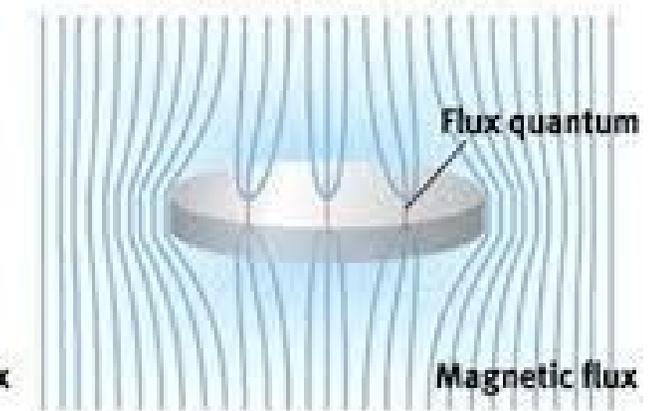
Эффект Мейснера — полное вытеснение магнитного поля из объёма проводника при его переходе в сверхпроводящее состояние. Впервые явление наблюдалось в 1933 году немецкими физиками В. Мейснером и Р. Оксенфельдом.



Сверхпроводник 2 рода
MEISSNER EFFECT



QUANTUM LOCKING



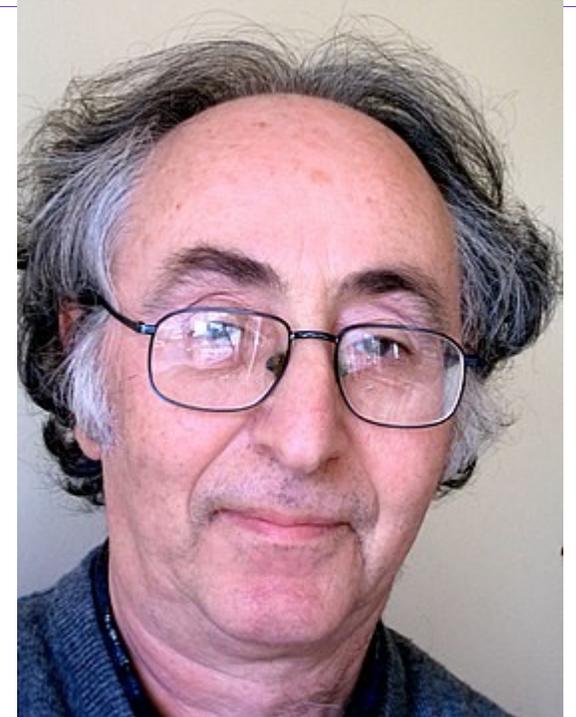
Эффекты Джозефсона.

Эффект Джозефсона — явление протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника.

Б. Джозефсон в 1962 году предсказал стационарный и нестационарный эффект в контакте сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник.

В своей работе Джозефсон предсказал, что в области диэлектрической прослойки будут интерферировать когерентные токи, исходящие из обоих сверхпроводников, так же как световые волны от двух когерентных источников.

Экспериментально стационарный эффект был подтвержден американскими физиками П. Андерсоном и Дж. Роуэллом в 1963 году.

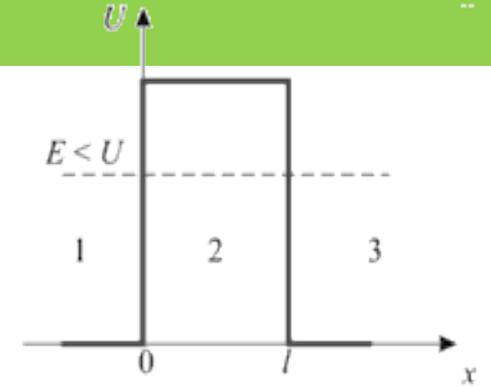


Брайан Дэвид Джозефсон— британский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1973 года.

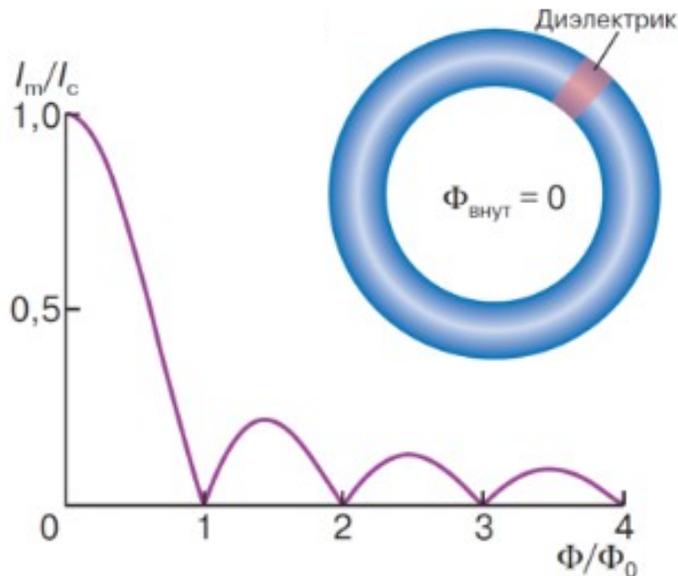
Эффект Джозефсона.

Туннельный эффект

соотношение неопределенностей $\Delta x \Delta p > \hbar$ (x – координата частицы, p – ее импульс). Если $\Delta x = d$ (d – толщина слоя диэлектрика) то неопределенность импульса $\Delta p > \hbar/\Delta x$, и кинетической энергии $p^2/(2m)$, т.е. при туннелировании закон сохранения энергии не нарушается



Стационарный эффект Джозефсона - через туннельный переход с тонким слоем диэлектрика, когда его толщина меньше или порядка длины когерентности ξ ($d \sim \xi$), возможно протекание сверхпроводящего тока, то есть тока без сопротивления.



Зависимость критического тока контакта от величины потока внешнего магнитного поля

сверхпроводящее состояние характеризуется когерентностью куперовских пар: эти пары электронов находятся на одном квантовом уровне и **описываются общей для всех пар волновой функцией.**

Если установить между двумя одинаковыми СП слабый контакт, то куперовские пары будут проникать из одного куска в другой и установится фазовая когерентность.

Возникнет единая волновая функция всего сверхпроводника, которую можно рассматривать как результат **интерференции волновых функций двух половинок.**

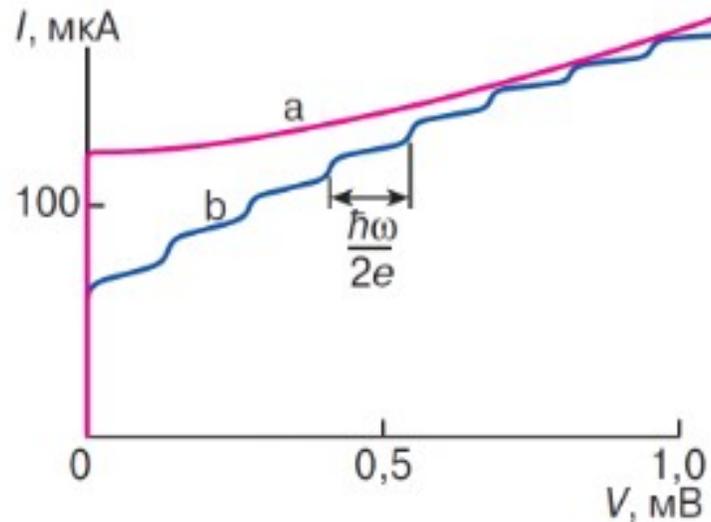
Эффект Джозефсона.

Нестационарный эффект Джозефсона - через туннельный переход с тонким слоем диэлектрика, если ток превышает критический, то на сверхпроводящем туннельном контакте появляется падение напряжения.

Такой переход генерирует переменный ток, частота которого ω задается соотношением Джозефсона:

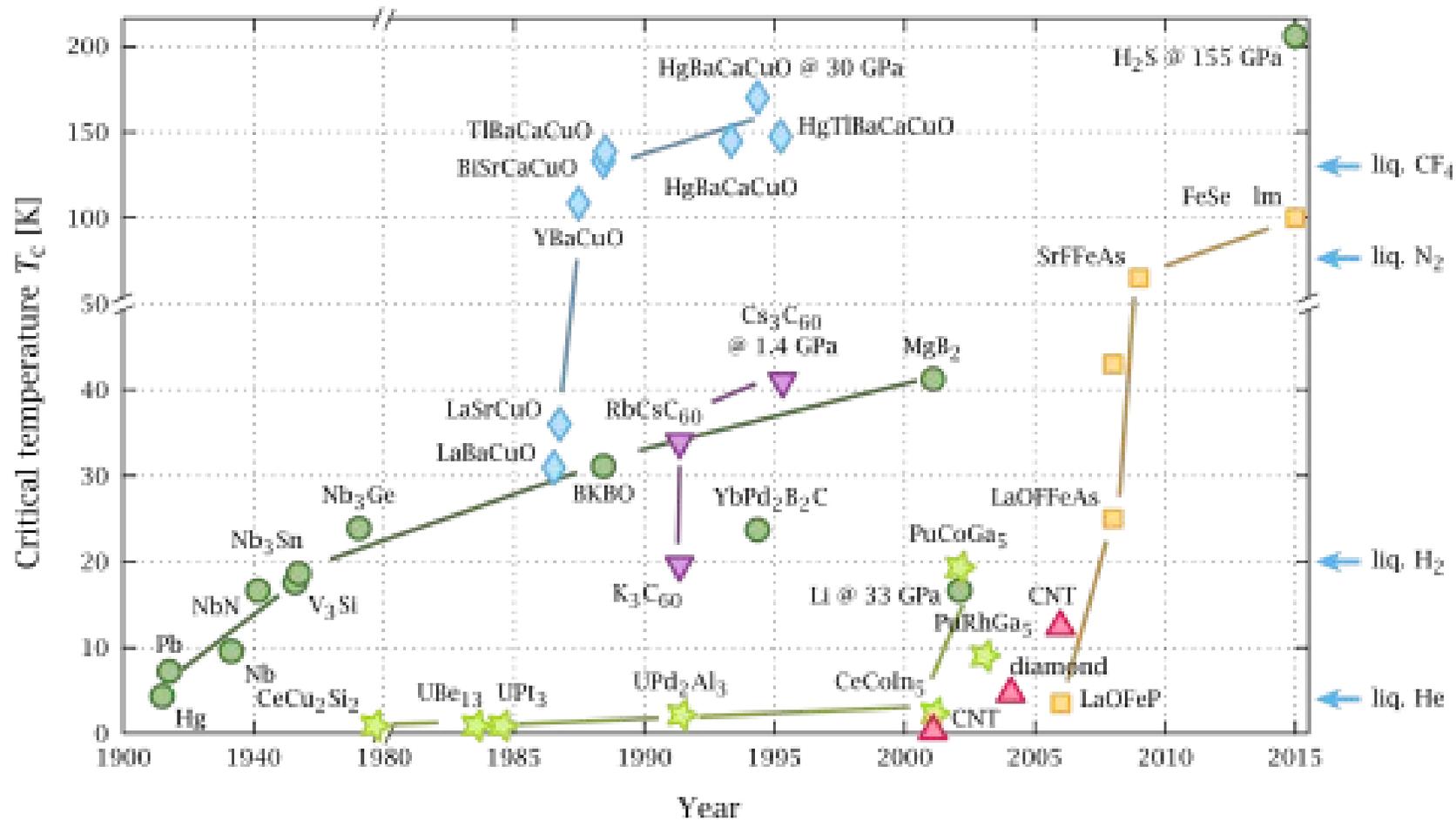
$$2eV = \hbar\omega$$

То есть, на туннельном переходе падает напряжение V , значит, электроны в одной из металлических обкладок будут обладать потенциальной энергией, большей на eV , чем электроны в другой.

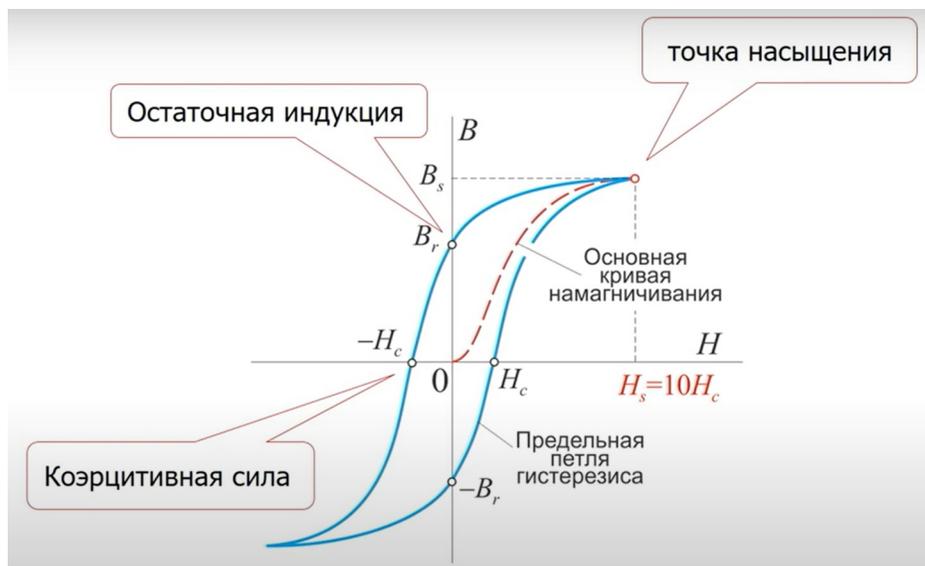
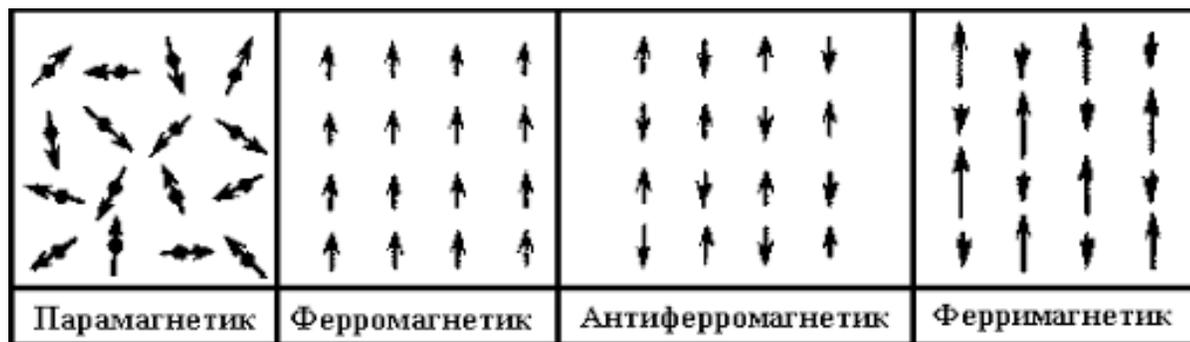


Вольт-амперная характеристика джозефсоновского перехода: а – без внешнего высокочастотного электромагнитного поля, б – высокочастотное поле включено

Хронология открытия сверхпроводников

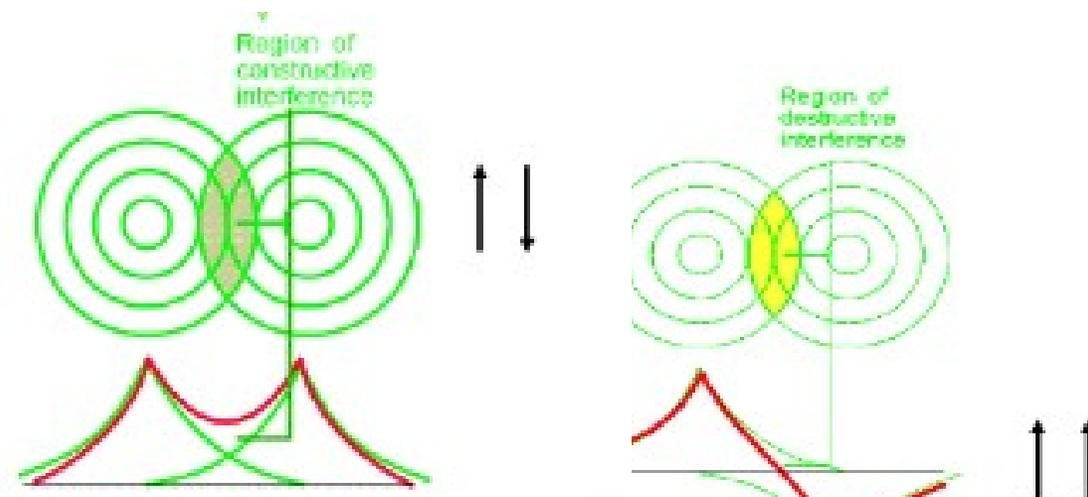


Ферромагнетизм. Остаточная намагниченность и коэрцитивная сила. Антиферромагнетизм и другие магнитоупорядоченные состояния.



Непрямой обмен – через посредников (супер обмен, РККИ)

Прямой обмен – связь между квантовыми системами, расположенными так близко, что есть перекрытие волновых функций. При прямом обмене может реализовываться ФМ и АФМ упорядочение в зависимости от соотношения кинетической энергии и энергии обменного взаимодействия



Принцип Паули – накладывает требование на симметрию ВФ относительно перестановки частиц

Квантовые осцилляционные эффекты в металлах и полупроводниках

Эффекты Шубникова–де-Гааза (ШдГ) и де-Гааза–ван Альфена (дГВА) были открыты в 1930 году были обнаружены периодические осцилляции магнетосопротивления и статической магнитной восприимчивости в зависимости от обратной величины внешнего магнитного поля в поперечном магнитном поле в пленках висмута. Причиной возникновения этих осцилляций является квантование продольного сопротивления и статической магнитной восприимчивости вследствие формирования дискретного спектра уровней Ландау

энергия свободной частицы +

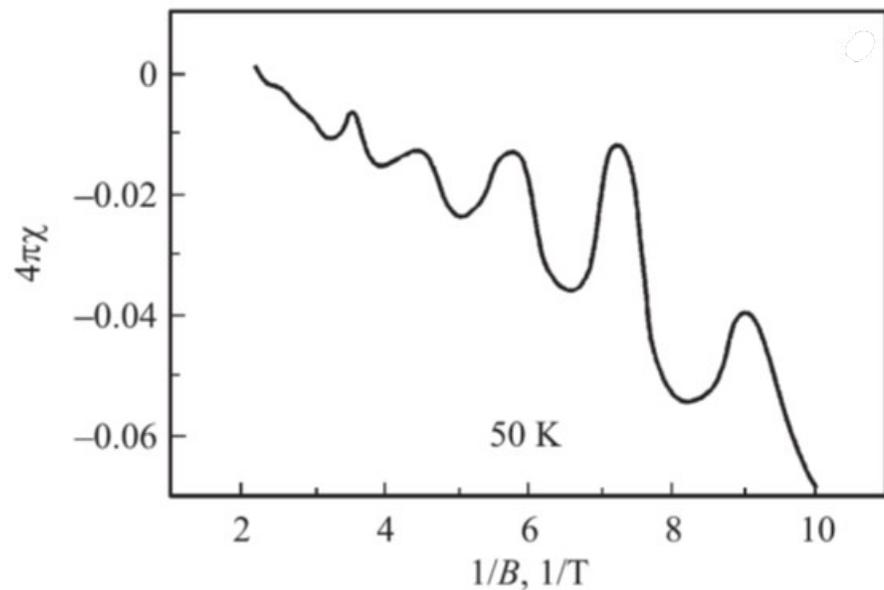
постоянное однородное магнитное поле $\mathbf{B} \parallel z$ не меняет продольную составляющую движения электрона и соответствующую компоненту энергии .

В плоскости, перпендикулярной \mathbf{B} , электроны начинают прецессировать с циклотроной частотой $\omega_c = |e|B/m_0$, энергия такого движения квантуется

Число заполненных уровней Ландау зависит от величины внешнего магнитного поля и плотности носителей тока

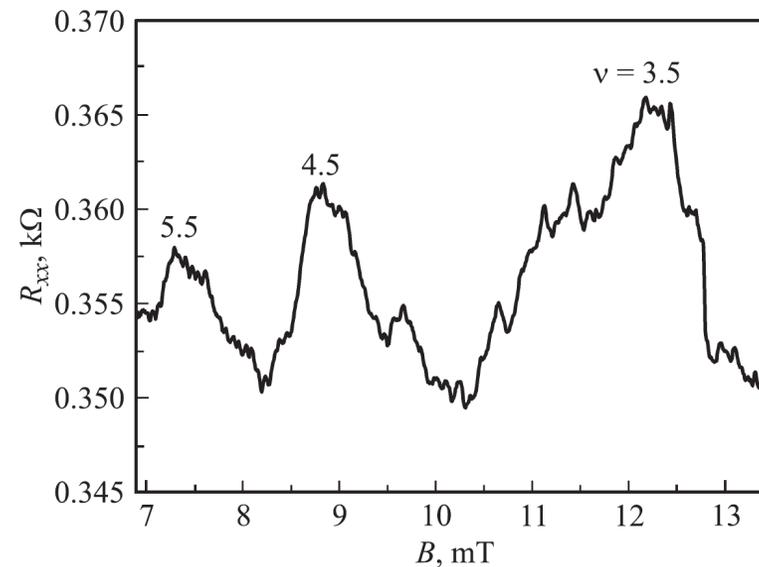
- При увеличении величины внешнего магнитного поля число заполненных уровней Ландау уменьшается, что сопровождается увеличением заполнения каждого из них при фиксированной позиции уровня Ферми.
- когда уровень Ландау пересекает уровень Ферми, наблюдается очередной пик в значениях продольного магнетосопротивления статической магнитной восприимчивости, совокупность которых формирует осцилляции ШдГ и дГВА

Квантовые осцилляционные эффекты в металлах и полупроводниках.
Эффект де Гааза ван Альфена. Эффект Шубникова — де Гааза.



Осцилляции де-Гааза–ван Альфена в полевой зависимости статической магнитной восприимчивости сверхузкая кремниевая квантовая яма р-типа проводимости на поверхности Si(100) n-типа, ограниченной сильно легированными бором δ -барьерами

Баграев, Н. Т., et al. "Осцилляции Шубникова– де-Гааза и де-Гааза– ван Альфена в кремниевых наноструктурах." Физика и техника полупроводников 45.11 (2011).



Осцилляции Шубникова де Гааза в полевой зависимости магнетосопротивления сверхузкой кремниевой квантовой ямы р-типа проводимости на поверхности Si(100) n-типа, ограниченной сильно легированными бором δ -барьерами

Баграев, Н. Т., et al. "Осцилляции Шубникова– де-Гааза и де-Гааза– ван Альфена в кремниевых наноструктурах." Физика и техника полупроводников 45.11 (2011).

Эффект Холла.

в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока, возникает электрическое поле в направлении, перпендикулярном направлениям тока и магнитного поля, называемое полем Холла. вызвано действием силы Лоренца, заставляющей электроны отклоняться в направлении, перпендикулярном скорости v . поле E_H уравнивает силу Лоренца, и между боковыми гранями образца возникнет разность потенциалов V_H .

I – сила тока через образец

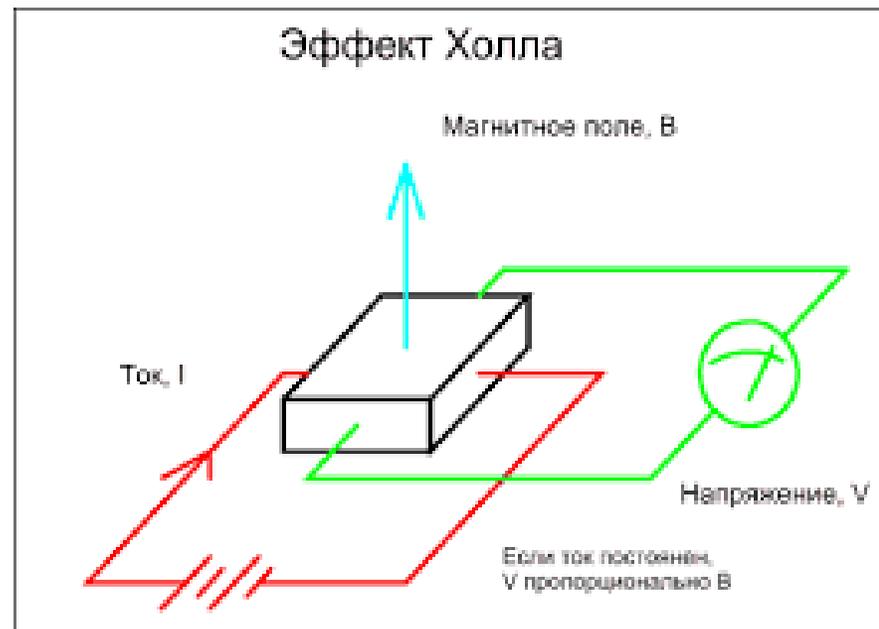
n – концентрация носителей заряда

e – заряд электрона

d – толщина образца

=

=



Аномальный эффект Холла

= +

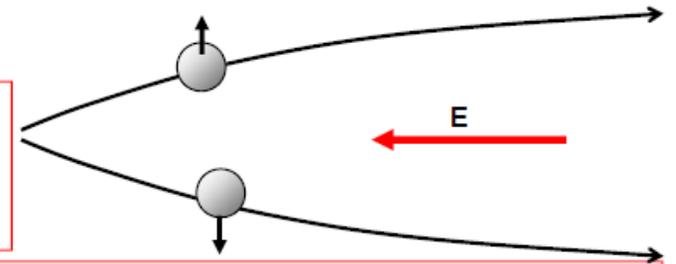
Появление нелинейного по магнитному полю вклада при наличии спонтанной намагниченности M . Существует несколько моделей, которые описывают появление аномального эффекта Холла. В частности, несимметричное рассеяние вследствие спин-орбитального взаимодействия электрона и примеси.

a) Intrinsic deflection

Interband coherence induced by an external electric field gives rise to a velocity contribution perpendicular to the field direction. These currents do not sum to zero in ferromagnets.

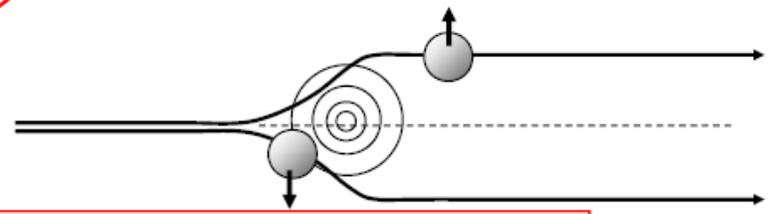
$$\frac{d\langle \vec{r} \rangle}{dt} = \frac{\partial E}{\hbar \partial \vec{k}} + \frac{e}{\hbar} \vec{E} \times \vec{b}_n$$

Electrons have an anomalous velocity perpendicular to the electric field related to their Berry's phase curvature



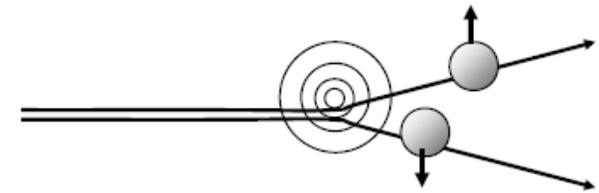
b) Side jump

The electron velocity is deflected in opposite directions by the opposite electric fields experienced upon approaching and leaving an impurity. The time-integrated velocity deflection is the side jump.



c) Skew scattering

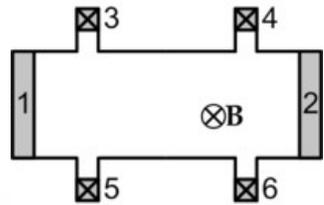
Asymmetric scattering due to the effective spin-orbit coupling of the electron or the impurity.



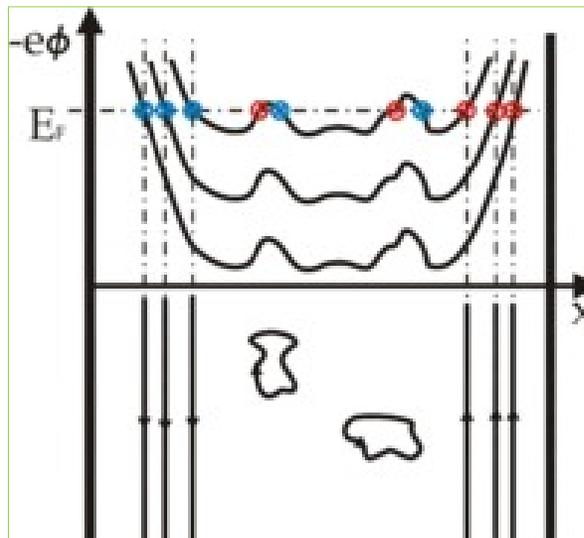
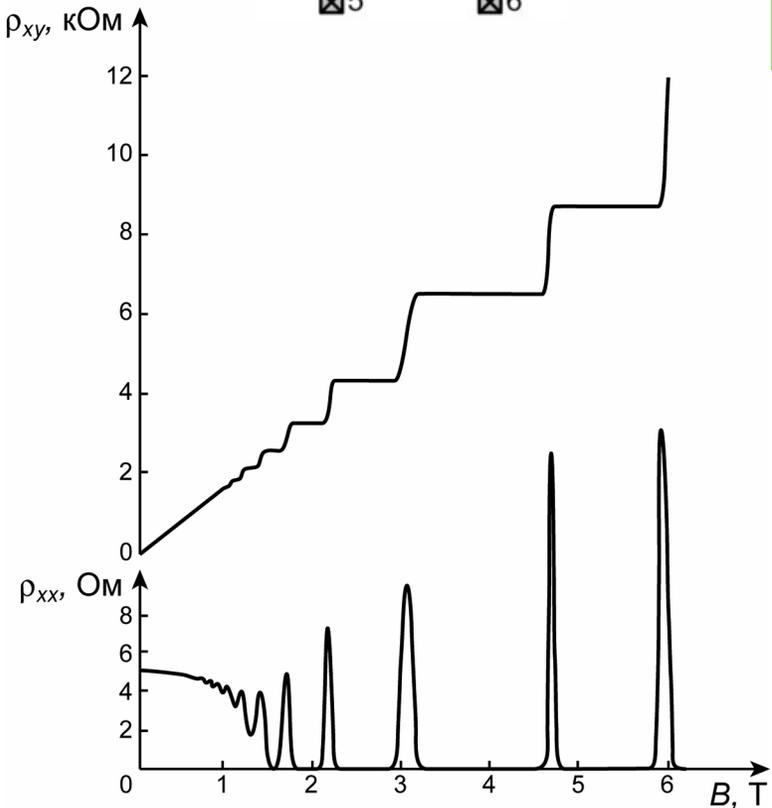
Целочисленный Квантовый эффект Холла.

Квантовый эффект Холла — эффект квантования холловского (поперечного) сопротивления вырожденного двумерного электронного газа от величины магнитной индукции, направленной перпендикулярно к поверхности двумерного электронного газа.

Целочисленный квантовый эффект Холла (КЭХ) был открыт Клаусом фон Клитцингом в 1980 году



Целочисленный квантовый эффект Холла на основе модели краевых состояний



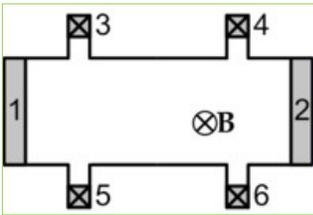
Клаус фон Клитцинг
Нобелевская премия по физике,
1985 год

Дробный квантовый эффект Холла.

Д.С.Тсуи, Х.Л.Штермер и А.С.Госсард провели эксперименты на гетероструктуре GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As и при низких температурах и в сильных полях наблюдали ступеньки холловской проводимости при значениях $[e^2/2\pi h]/3$, т.е. на зависимости $(\rho)_{XY}(B)$ появлялось плато $(\rho)_{XY} = 2\pi h/e^2\nu$ при $\nu = 1/3$ при “заливке” ровно $1/3$ первой зоны Ландау

$$(\rho)_{XY} = 2\pi h/e^2\nu \text{ при } \nu = 1/3$$

значения сопротивления на «плато», где e — заряд электрона, h — постоянная Планка, ν — $1/m$, m - натуральное число, фактор заполнения уровней Ландау



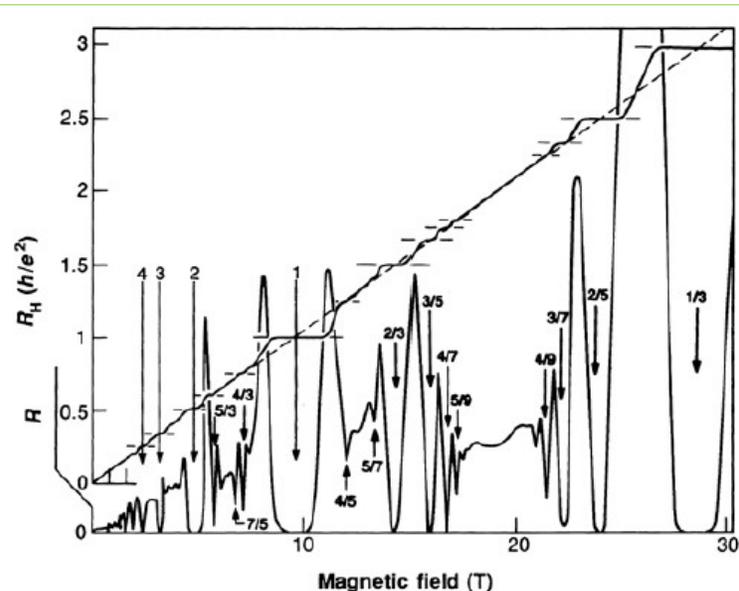
Дробный квантовый эффект Холла наблюдается в электронных системах с сильным взаимодействием (сильно коррелированные системы).

электроны в двумерном слое вследствие сильного кулоновского отталкивания образуют несжимаемую квантовую жидкость - *жидкость Лафлина*

Жидкость Лафлина оказалась новым квантовым состоянием двумерной взаимодействующей системы. Она несжимаема и имеет энергетическую щель D в спектре возбуждений (по оценкам, $D \sim 4-5\text{K}$). особенность состояния Лафлина - элементарные возбуждения в нем могут иметь дробный заряд



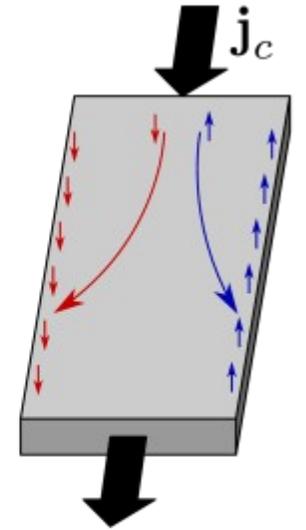
Нобелевская премия
по физике,
1985 год



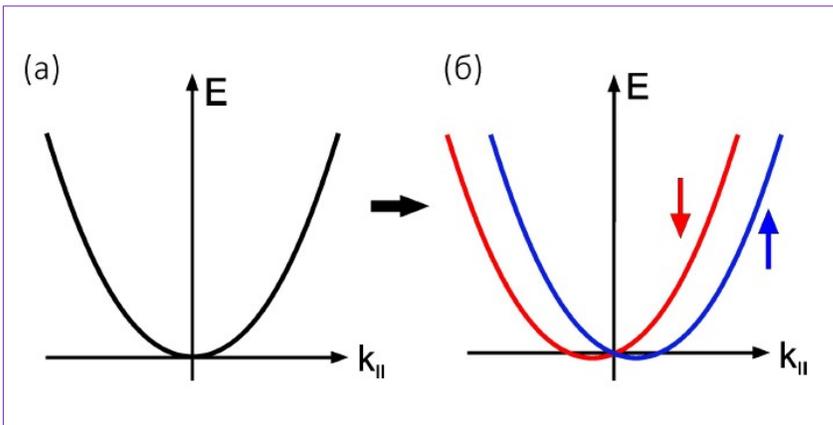
Спиновый эффект Холла.

Спиновый эффект Холла — отклонение электронов с антипараллельными спинами к противоположным сторонам немагнитного проводника при отсутствии внешнего магнитного поля.

Теоретически он был предсказан М. И. Дьяконовым и В. И. Перелем в 1971 году.



1. спин-зависимое рассеяние на полях примесей. Электроны с одним направлением спина рассеиваются в одну сторону перпендикулярно электрическому полю, а с противоположным направлением спина — в другую
2. Отклонение носителей тока с противоположными направлениями тока из-за спин-орбитального (СО) взаимодействия, которое приводит к тому, что электроны с разным направлением спина имеют различную энергию



С.О. взаимодействие в твердых телах можно разбить на 2 типа:

1. Независимое от симметрии кристалла.

Существует во всех типах кристаллов, происходит от С.О. взаимодействия атомных орбиталей (С.О. взаимодействия, как и в случае атома, приводит к поправке по энергии соответствующих уровней и расщеплению состояний.)

2. Связанное с нарушением симметрии в кристалле.

(может приводить к снятию вырождения состояний по спину)

а)Эффект Дрессельхауса (Нарушение инверсионной симметрии в объеме кристалла)

б)Эффект Бычкова-Рашба (Нарушение инверсионной симметрии на поверхности)

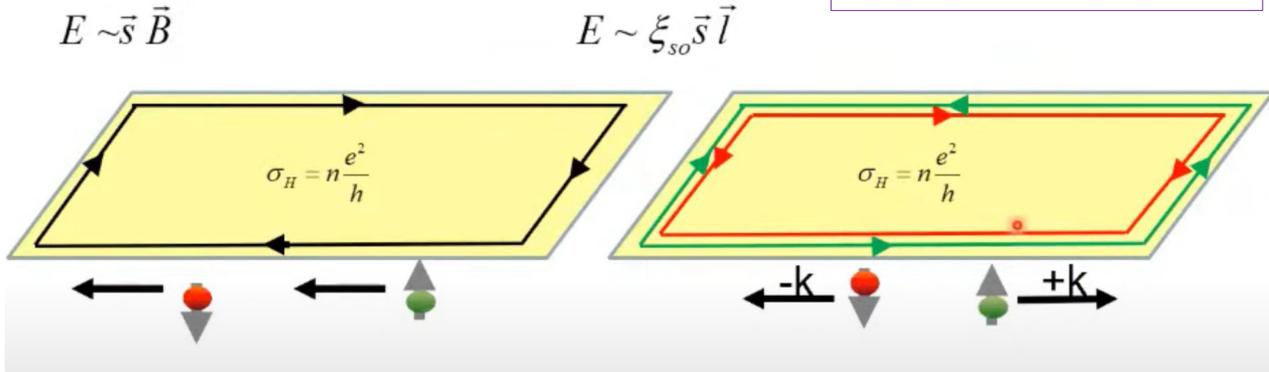
Квантовый спиновый эффект холла. Двумерные топологические изоляторы.

Квантовый эффект Холла и поверхностные состояния

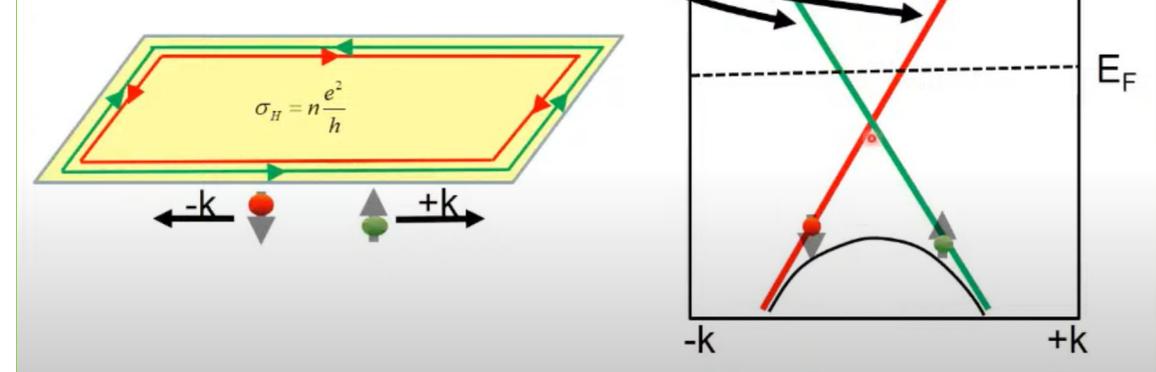
“Локинг” взаимной ориентации спина и момента (spin-momentum locking), поляризованные поверхностные состояния

Сильное магнитное поле B

Спин-орбитальное взаимодействие



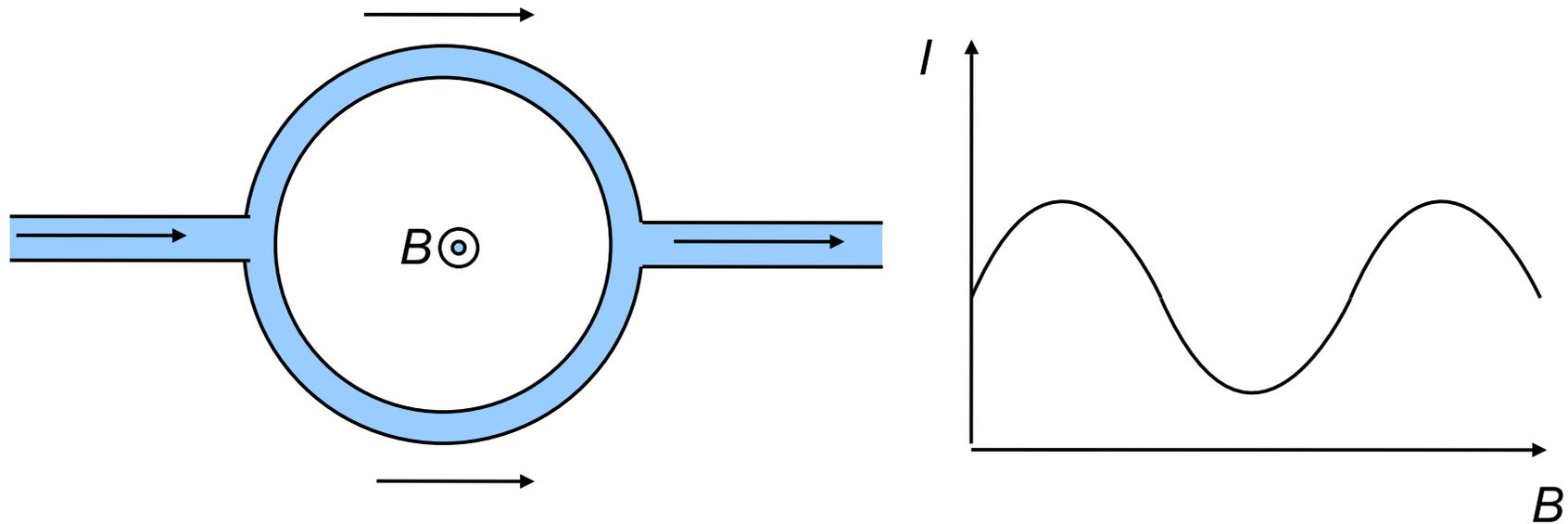
Поверхностные состояния



Наличие магнитного поля, однозначно определяет направление вращения электронов, краевое 1D проводящее состояние является киральным, Проявляется как бездиссипативный ток зарядов по краю, устойчивый по отношению к дефектам

На границе с вакуумом показаны спиральные краевые состояния с различным направлением спина.

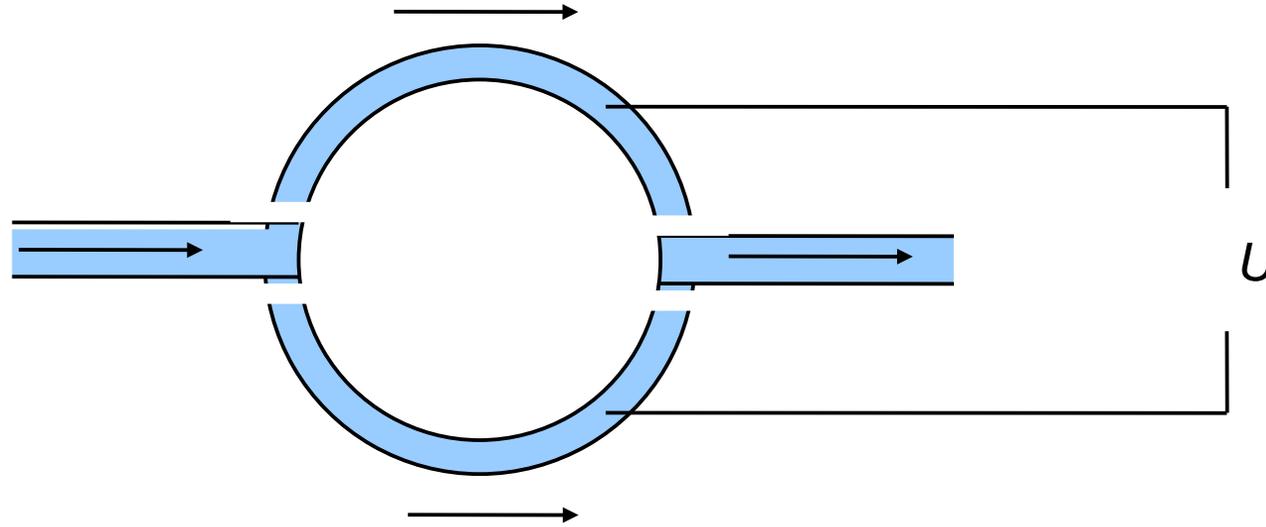
Магнитный эффект Ааронова-Бома



Ток в баллистическом режиме осциллирует в зависимости от магнитного поля с периодом

$$T_{AB} = \frac{\Phi_0}{S} = \frac{2\pi\hbar}{\pi e R^2}$$

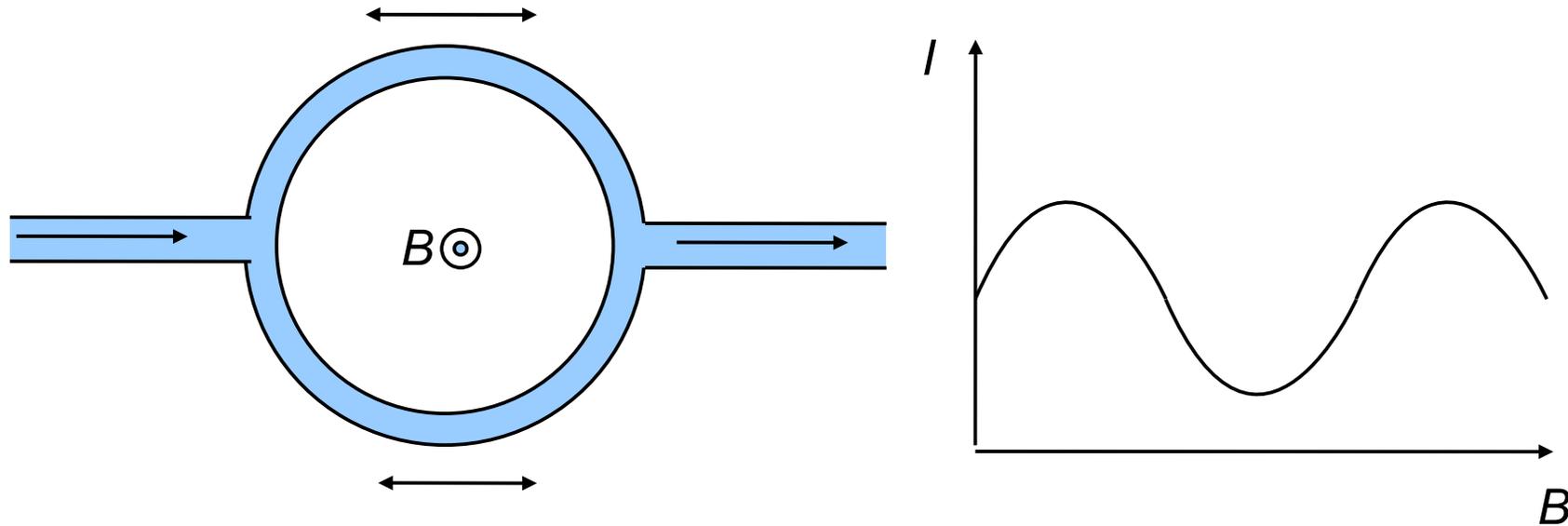
Электрический эффект Ааронова-Бома



Ток в баллистическом режиме осциллирует в зависимости от напряжения с периодом

$$T_{AB} = \frac{2\hbar v_F}{eR}$$

Магнитный псевдо эффект Ааронова-Бома



Ток в баллистическом режиме осциллирует в зависимости от магнитного поля с периодом

$$T_{AB} = 2 \frac{\Phi_0}{S} = \frac{4\pi\hbar}{\pi e R^2}$$