

Методы измерения физических величин

Квантовые эффекты в физических
измерениях.

Квантовая метрология

Квантовая метрология - изучает процесс измерений, базирующихся на квантовых явлениях.

Основная проблема Квантовой метрологии - установление так называемой естественной системы единиц физических величин на основе фундаментальных констант.

Одна из её задач – выявление и изучение погрешностей, вызываемых ограничениями квантового характера.

Квантовая метрология базируется на результатах квантовой физики.

Экспериментальные истоки квантовой физики

- › **Теория теплового излучения** существовавшая в конце XIX века гласила, что полная мощность теплового излучения любого нагретого тела должна быть бесконечной. Этот парадокс был назван «ультрафиолетовой катастрофой». Проблема была решена при помощи квантовой теории излучения Макса Планка в 1900 году. [\(38\)](#)
- › Изучая явление **фотоэффекта** А. Эйнштейн в 1905 году предположил, что свет не только испускается, но и поглощается в виде отдельных порций – фотонов.
- › В 1922 году А. Комптон изучал рассеянии рентгеновских лучей на свободных электронах. Он показал, что при этом происходит изменение длины волны излучения. Объяснить эффект можно, если рассматривать рассеяние света как упругие соударения потока фотонов со слабосвязанными электронами вещества.

Экспериментальные истоки квантовой физики

- › В 1924 году Л. Де-Бройль выдвинул гипотезу о всеобщности корпускулярно-волнового дуализма. По этой гипотезе любой объект проявляет как волновые так и корпускулярные свойства.
- › В 1905 году А. Эйнштейн построил теорию теплоемкости твердых тел которая качественно согласовывалась с экспериментальными данными. Тепловое движение твердых тел можно свести к колебаниям атомов.
- › Опыты Э. Резерфорда по строению атома показали, что атом имеет планетарное строение. В центре малое массивное ядро, а вокруг него движутся электроны. Но из уравнений Максвелла следует, что заряд, движущийся с ускорением, обязательно должен излучать электромагнитные волны.
- › Н. Бор в 1913 году предположил, что излучение атома подчиняется квантовым законам. В частности, излучение возникает лишь при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую.

Экспериментальные истоки квантовой физики

- › Существование дискретных уровней энергии атомов было экспериментально подтверждено в опытах Франка и Герца по изучению поведения вольт-амперной характеристики электровакуумной лампы [1]. Пики на вольт-амперной лампы показывают, что атомы могут принимать энергию только порциями.

Основополагающие принципы

- › Корпускулярно-волновой дуализм. Это всеобщее и универсальное свойство материи, которое состоит в одновременном наличии и свойств частицы и свойств волны у любого материального объекта.

Формулы Де-Бройля:

$$\vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}, \quad \omega = \frac{E}{\hbar}, \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

Согласно этим соотношениям

$$X = \sum_{i=1}^N c_i X_i \quad P(n) = \frac{|c_n|^2}{\sum_{i=1}^N |c_i|^2}$$

- › Принцип суперпозиции состояний, который гласит, что если система может находиться в N разных состояниях X_1, X_2, X_3 и т.д., в которых физическая величина f принимает значения f_1, f_2, f_3 и т.д. соответственно, то система может находиться и в состоянии X , которое является линейной суперпозицией («смешением») указанных состояний:

Основопологающие принципы

- › Совместить волновые и корпускулярные свойства материи позволяет отказ от детерминированного описания движения отдельной частицы и переход к описанию вероятностному.

Соотношение неопределённостей Гейзенберга

- › Корпускулярно-волновой дуализм накладывает определенные ограничения на измерения состояний частиц. Корпускулярная природа описывается точной траекторией, заданием положения и скорости частицы. Волновая природа задается только направлением распространения, частотой и длиной волны. В отличие от частицы волна не имеет траектории. Плоская монохроматическая волна существует во всем пространстве. Значит, в соответствии с принципом дуализма частица не может иметь «точной» траектории. Может быть только некая линия, вблизи которой наиболее вероятно обнаружить частицу. То есть при измерении положения частицы принципиально невозможно получить точные данные.

Соотношение неопределённостей Гейзенберга

- › Эти соображения приводят к принципу неопределенности. Согласно этому принципу существуют пары физических величин, точные значения которых микрочастица не может иметь одновременно.
- › Математическим выражением этого принципа служит соотношение неопределенностей Гейзенберга:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \text{ где } \hbar \text{ – приведённая постоянная Планка.}$$

- › Интересно отметить, что например координата x и проекция импульса p могут иметь совместные определённые значения.

Волновая функция

- › Основываясь на идеях Де-Бройля, Эрвин Шрёдингер сопоставил движению частицы комплексную функцию координат и времени, которую назвал волновой функцией и обозначил $\Psi(x,y,z,t)$ (пси-функция).
- › В интерпретации Макса Борна, вероятность обнаружения частицы, в малом объёме dV , равна $dP = dV$
- › Эволюция волновой функции определяется уравнением Шредингера имеет вид $\Psi(x,y,z,t)=\psi(x,y,z)$

Волновая функция

- › Подставив решение в уравнение Шредингера, можно получить стационарное уравнение Шредингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E \psi(x), \text{ где } \hbar - \text{приведённая}$$

постоянная Планка, $U(x)$ – потенциальная энергия, E – полная энергия, $\psi(x)$ – волновая функция.

Квантование энергии

- › Рассмотрим поведение гармонического осциллятора в квантовой механике.

$$U = \frac{1}{2} k x^2 \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \Rightarrow U = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2$$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left[E - \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right] \psi = 0$$

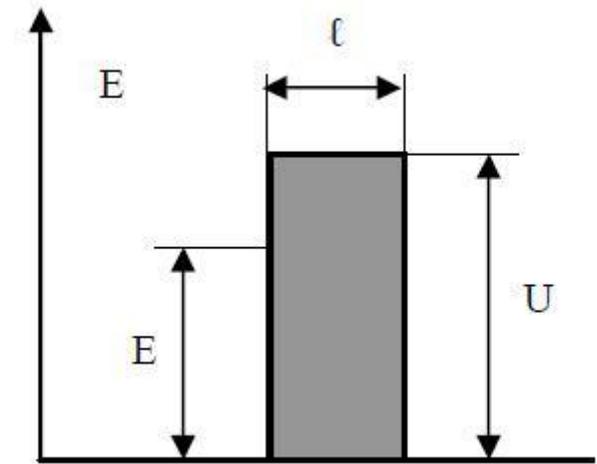
$$E_n = \left[n + \frac{1}{2} \right] \hbar \omega$$

Туннельный эффект

- › Туннелирование – это специфический квантовомеханический эффект, прохождения частицы сквозь потенциальный барьер.

$$D \cong \exp\left[-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2ml(U_0 - E)}\right], \text{ при } E < U_0$$

D – коэффициент проницаемости



Неравенства Белла

- › **Теорема Белла** гласит, что *не существует физической теории локальных скрытых переменных которая воспроизводила бы все предсказания квантовой механики*. Т. е. если квантовая физика верна, то в ней не существует неких скрытых параметров.
- › С позиций современной теории измерений, роль прибора заключается в «приготовлении» некоторого состояния квантовой системы. То есть, в соответствии с принципом суперпозиции, прибор обнаруживает квантовую систему в одном из возможных состояний.

Неравенства Белла

- › Теорему Белла можно трактовать следующим образом: *измерение, проводимое в одной точке, может влиять на результаты измерения, проводимого в другой точке. Это верно, даже если измерения проводятся одновременно, а расстояние между точками такое, что даже свет не успеет за время измерения дойти от одной точки до другой. Это также говорит о существовании более сильных корреляций между частицами, чем предсказывает любая локальная теория скрытых параметров.*
- › Теорема Белла подтверждена экспериментально. [2]

Квантовые невозмущающие измерения

- › Это измерения, которые не изменяют состояния исследуемой системы. Это возможно, только если состояние является собственным для оператора измеряемой величины. Идея КНИ и сам термин предложены в 1974 году советскими учеными Брагинским и Воронцовым.
- › Необходимым условием реализации КНИ является уменьшение всех флуктуаций неквантовой природы до уровня, меньшего чисто квантовых. [3]

Сверхтекучесть

- › Сверхтекучесть, т.е. перенос макроскопической массы вещества без трения. Эффект открыт в 1938 году П.Л. Капицей для ^4He при температуре $T \leq 2.17$ К.
- › Объяснение дано Л. Ландау на основании состояния т.н. бозе-конденсата.
- › Можно наблюдать долгоживущее течение жидкости в кольцевом канале без подвода энергии. Причем скорость такого движения является квантованной. То есть вся жидкость разбивается на части, которые перемещаются со строго определенными скоростями.

Сверхпроводимость

- › Явление сверхпроводимости состоит в полном исчезновении электрического сопротивления у многих материалов при понижении температуры ниже определенной критической температуры с T_c .
- › Явление сверхпроводимости открыто в 1911 году Камерлинг-Оннесом.
- › Объяснено в 1957 году Дж. Бардиным, Л. Купером и Дж. Шриффер (модель БКШ). В 1956 году Л. Купер показал, что два фермиона могут образовать одно связанное состояние. Т. о. электроны в металле образуют куперовские пары, которые в свою очередь образуют бозе-конденсат. Такой коллектив частиц может проявить сверхтекучесть, а незатухающее течение заряженной жидкости и есть сверхпроводимость.

Сверхпроводимость. Эффект Джозефсона.

- › Был теоретически предсказан в 1962 году Б. Джозефсоном. Заключается в протекании сверхпроводящего тока через тонкую прослойку диэлектрика или не сверхпроводящего материала, помещенного между двумя сверхпроводниками.
- › Различают стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона.
- › **Стационарный эффект Джозефсона** существует при протекании малого тока через контакт. При этом весь ток сверхпроводящий и напряжение на контакте отсутствует. Существование тока обусловлено тем, что куперовские пары способны туннелировать через тонкую прослойку, не разрушаясь при этом.

Сверхпроводимость. Эффект Джозефсона.

- › Нестационарный эффект Джозефсона возникает при достижении некоторого критического значения тока I_c . При этом через джозефсоновский контакт туннелируют как куперовские пары, так и отдельные электроны. Соответственно ток имеет как сверхпроводящую составляющую, так и не сверхпроводящую. В результате на контакте возникает напряжение.
- › При этом сверхпроводящая часть тока, становится переменной. Частота сверхпроводящего тока через контакт определяется соотношением:

$$\omega = \frac{2e}{\hbar} U$$

1 мкВ соответствует 483.6 МГц

Сверхпроводимость. Эффект Джозефсона.

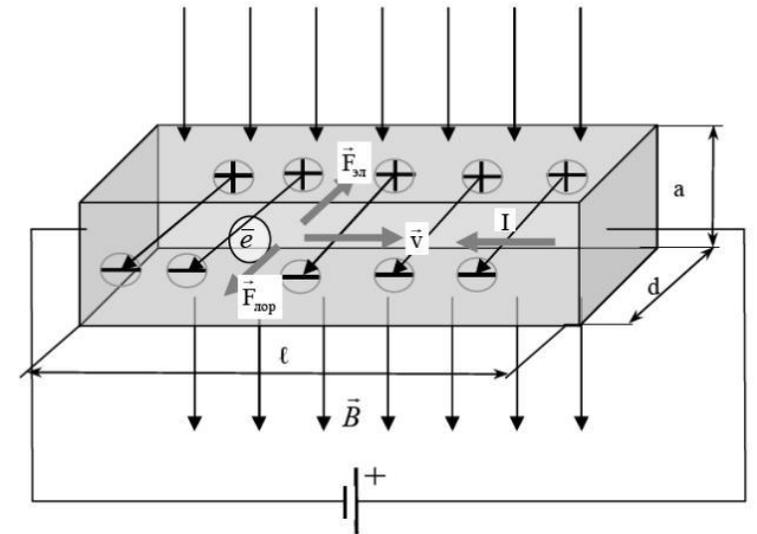
- › Эффект Джозефсона используется в приборостроении, в частности даёт очень точный эталон напряжения.

Квантовый эффект Холла.

› **Классический эффект Холла** заключается в том, что в проводнике с током, помещенным в магнитное поле, возникает поперечная разность потенциалов.

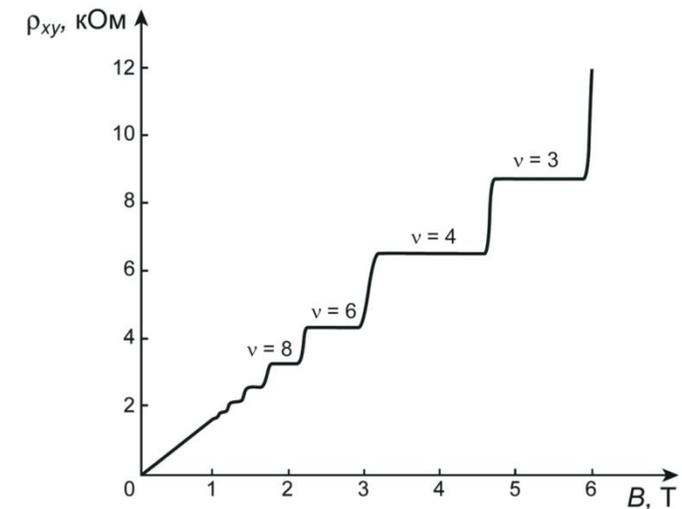
› **Квантовый эффект Холла**

эффект квантования холловского сопротивления или проводимости двумерного электронного газа в сильных магнитных полях и при низких температурах.



Квантовый эффект Холла.

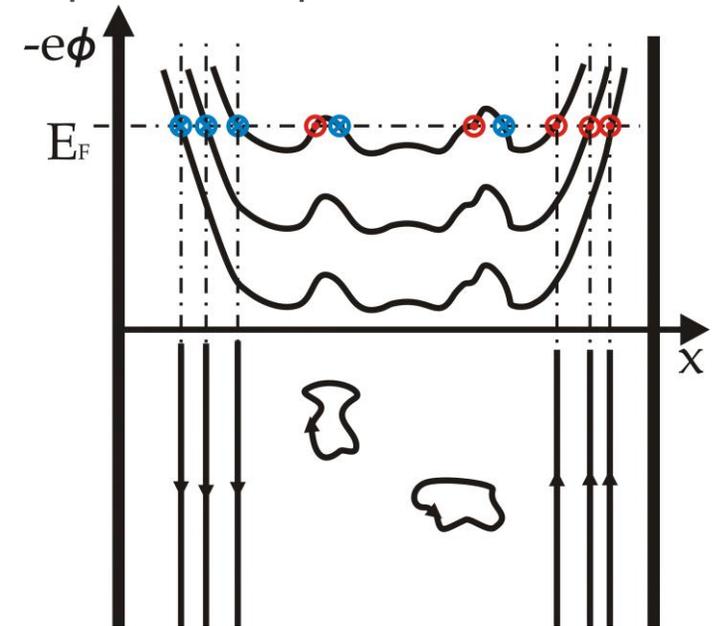
- › Продольное напряжение при увеличении поля уменьшается во много раз, т.е. почти исчезает.
- › Целочисленный квантовый эффект Холла был обнаружен экспериментально в 1980 году Фон Клитцингом.
- › Эффект определяется характерным Холловским сопротивлением $R_H = h/ve^2$, при $v=1$ $R_H = 25813$ Ом.



Квантовый эффект Холла.

- > Возле края формируется обедняющее электрическое поле, направленное к краю. Оно приводит к зависимости нуля отсчёта уровней Ландау от координаты, поэтому уровни Ландау «изгибаются» вверх вблизи края. Как известно в скрещенных магнитном и электрическом полях заряженная частица дрейфует вдоль линии постоянной энергии — эквипотенциали. Электроны заполняют состояния согласно статистике Ферми — Дирака до некоторого уровня Ферми, и при факторе заполнения ν , близком к целочисленному значению вдали от краёв формируются локализованные состояния, не участвующие в проводимости, а вблизи краёв — краевые токовые состояния.

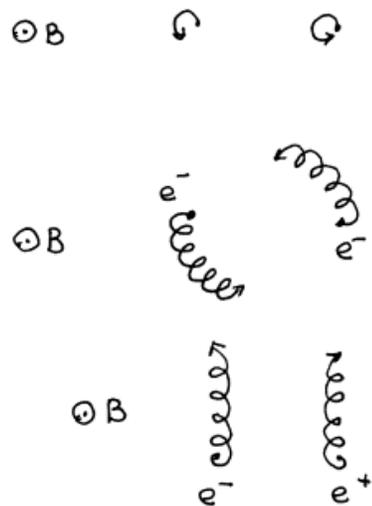
Причем ток на противоположных берегах двумерного электронного газа имеет противоположное направление, а направление обхода однозначно задаётся знаком квантующего магнитного поля. Ток переносимый каждым краевым состоянием квантован и равен $\mu e^2/h$, где μ — значение электрохимического потенциала. А число краевых каналов целое и определяется фактором заполнения ν .



Дробный квантовый эффект Холла.

- › В 1982 году Даниэль Цуи и Хорст Штёрмер заметили, что «плато» в холловском сопротивлении наблюдаются не только при целых значениях n , но и в существенно более сильных магнитных полях^[5] при $n=1/3$. В дальнейшем были обнаружены плато электрического сопротивления и при других дробных значениях n , например при $n=2/5$, $3/7$
- › Суть явления заключается в том, что группа электронов «объединяются» в новую «частицу», заряд которой меньше заряда электрона. Причина заключается во взаимодействии между электронами. Магнитное поле создает «вихри», по одному на каждый квант магнитного потока. Принцип Паули требует, чтобы каждый электрон был окружен одним «вихрем». Когда магнитные поля превышают величину, соответствующую ЦКЭХ с $i=1$, вихрем становится больше, чем электронов. Принцип Паули выполняется при размещении нескольких вихрей на электроны, которые уменьшают межэлектронное кулоновское отталкивание. Электрон «захватывает» квант магнитного потока и становится «составной частицей». Электрон, захвативший четное число квантов потока, становится фермионом, а нечетное число квантов потока — бозоном.

Дробный квантовый эффект Холла.



Поведение двух
заряженных
частиц в сильном
магнитном поле

Дробный квантовый эффект Холла.

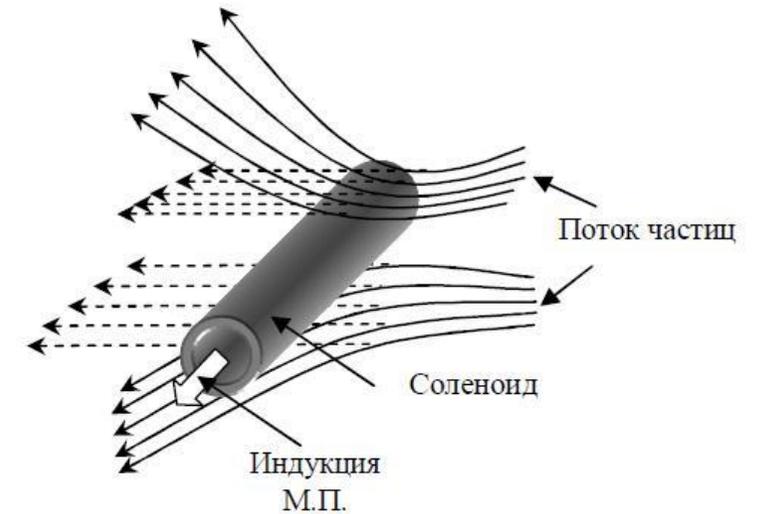
- › При заполнении на $1/3$ нижнего уровня Ландау каждый электрон принимает три кванта магнитного потока. Таким образом получается композитный бозон. Он находится в условиях нулевого магнитного поля (оно уже включено в новую частицу) и в состоянии бозе-конденсации в новом энергетическом состоянии. Когда часть вихрей магнитного поля не захвачена, возникает дробный дефицит заряда в каждом из этих вихрей. По сравнению с электронами, это положительные дробные заряды. Квазичастицы могут свободно двигаться и проводить электрический ток. Отличие в том, что носители электрического тока — не электроны, а частицы с дробным зарядом.

Эффект Ааронова-Бома.

- › **Эффéкт Аарóнова — Бóма** — квантовое явление, в котором на частицу с электрическим зарядом или магнитным моментом электромагнитное поле влияет даже в тех областях, где напряжённость электрического поля \mathbf{E} и индукция магнитного поля \mathbf{B} равны нулю, но не равны нулю скалярный и/или векторный потенциал электромагнитного поля (то есть если не равен нулю электромагнитный потенциал).

Эффект Ааронова-Бома.

- › Эффект заключается во влияние на состояние частицы внешнего электромагнитного поля, сосредоточенного в недоступной для частицы области.
- › Если на пути летящей заряженной частицы перпендикулярно ее траектории расположен бесконечно длинный соленоид, с магнитным полем. Сила Лоренца, при этом, на частицу не действует, но ее волновая функция зависит от поля внутри соленоида. Поэтому появляется рассеяние потока частиц.



Эффект Ааронова-Бома.

- › Характерная особенность возникает, если поток внутри соленоида равен $\Phi = n \Phi_0$, при этом

$$\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar c}{e}$$

- › В таком случае рассеяние исчезает.
- › Эффект подтверждён экспериментально.
- › Эффект Ааронова-Бома позволяет создать точный эталон магнитного потока.

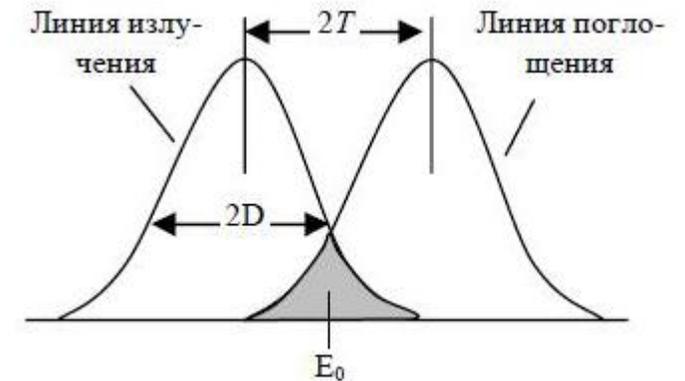
Эффект Зеемана.

- › **Эффéкт Зеемáна** — расщепление линий атомных спектров в магнитном поле. Назван в честь Питера Зеемана, открывшего эффект в 1896 году.
- › Эффект обусловлен тем, что в присутствии магнитного поля электрон приобретает дополнительную энергию $\Delta E = -\mu \cdot B$. Приобретённая энергия приводит к снятию вырождения атомных состояний по магнитному квантовому числу m_j и расщеплению атомных спектральных линий.

Эффект Мёссбауэра

- › Ядра атомов имеют энергетические уровни, самый низкий из которых называется *нормальным*. Переходы между уровнями приводят к появлению коротковолнового электромагнитного излучения, которое называют γ -излучением.

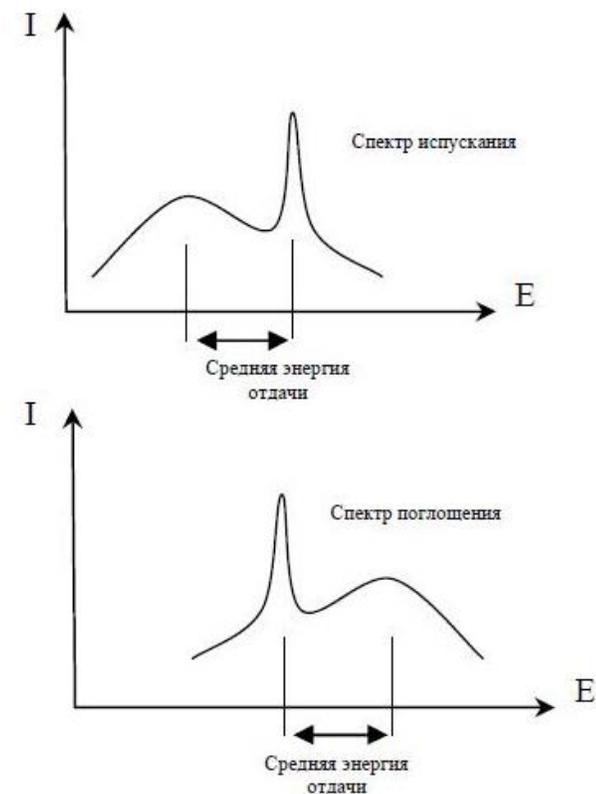
$$p = \frac{E}{c}, \text{ соответственно энергия поступательного движения равна } T = \frac{p^2}{2m}$$



Эффект Мёссбауэра

› В 1958 году Мёссбауэр обнаружил наличие узких резонансных линий в спектрах иридия. В настоящее время эффект Мёссбауэра наблюдается для 41 элемента.

› Объясняется передачей импульса кванта всей кристаллической решетке как целому, что является чисто квантово-механическим эффектом. Так как импульс отдачи передается массивной кристаллической решетке, то энергия излучаемых и поглощаемых квантов практически точно равна энергии ядерного перехода



Эффект Мёссбауэра

- › Ширина резонансных линий при ЭМ столь мала, что позволяет измерять энергию квантов с точностью до 15-й значащей цифры. В частности, с использованием этого эффекта удалось зарегистрировать изменение частоты γ -квантов при распространении вверх. При этом разность высот в опыте была всего 21 метр.
- › В настоящее время эффект Мёссбауэра наблюдается у 87 изотопов 46 элементов — так называемых мёссбауэровских изотопов.

Индукцированное излучение

- › Обычно рассматривают 2 вида переходов между энергетическими уровнями атомов (молекул). Это спонтанные переходы с более высоких уровней на нижние и переходы под действием излучения на вышележащие уровни.
- › При переходах первого вида могут излучаться фотоны, а переходы второго вида происходят при поглощении излучения веществом.
- › В 1918 году А.Эйнштейн обратил внимание, что этих переходов недостаточно для объяснения равновесия между веществом и излучением. Действительно, вероятность спонтанных переходов определяется только внутренними свойствами атомов и не зависит от интенсивности света. А вероятность поглощательных переходов зависит как от свойств атомов, так и от интенсивности падающего излучения.

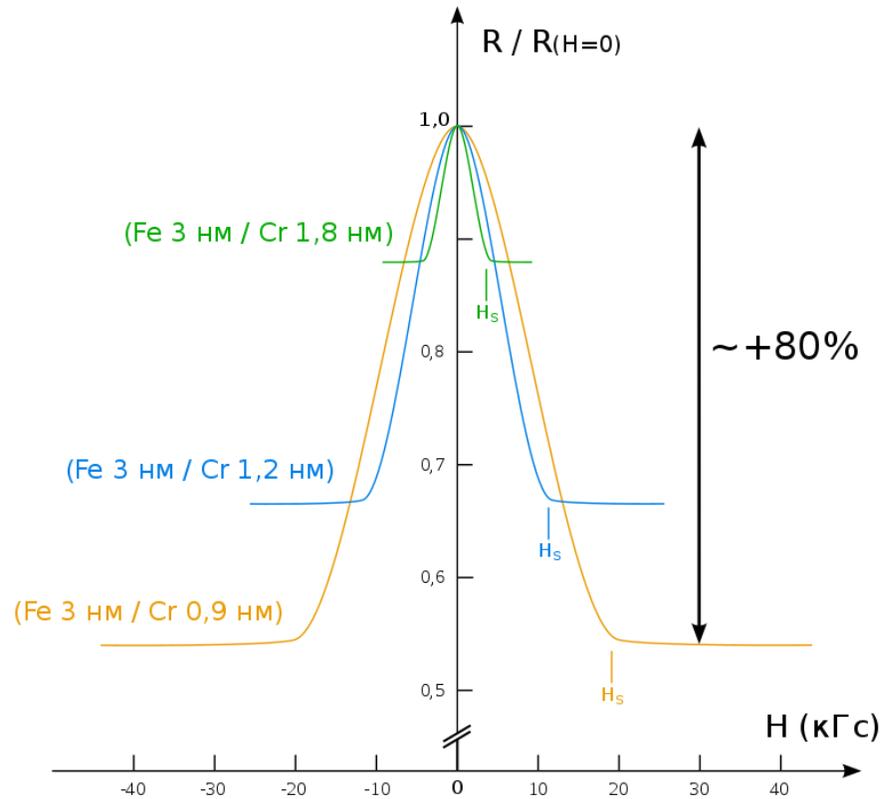
Индуцированное излучение

- › Чтобы существовало равновесие, следует допустить, что возможны переходы с излучением фотонов под действием падающего света. Вероятность таких переходов должна возрастать с ростом интенсивности света. Возникающее таким образом излучение называют вынужденным (индуцированным).
- › Вынужденное излучение обладает важным свойством. Оно имеет ту же *частоту, фазу и поляризацию*, что и падающего излучения. И направлено оно точно так же. Значит, падающее излучение и вынужденное строго *когерентны*.

Гигантское магнетосопротивление

- › **Гигантское магнетосопротивление** — квантовомеханический эффект, наблюдаемый в тонких металлических плёнках, состоящих из чередующихся *ферромагнитных* и *проводящих немагнитных* слоёв. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоёв.
- › За открытие гигантского магнетосопротивления в 1988 году физики Альбер Ферт и Петер Грюнберг были удостоены Нобелевской премии по физике в 2007 году [7].

Гигантское магнетосопротивление



Изменение сопротивления Fe/Cr сверхрешёток при температуре 4,2 К при приложении внешнего магнитного поля напряжённостью H . Справа стрелкой указано наибольшее достигнутое изменение в процентах. H_s — поле насыщения.

Гигантское магнетосопротивление

- › В основе эффекта лежит так называемое спин-зависимое рассеяние электронов в сверхрешётке (зависимость сопротивления слоёв от взаимной ориентации их намагниченности и направления спинов электронов).
- › Основная сфера применения эффекта — датчики магнитного поля, используемые для считывания информации в жёстких дисках, биосенсорах, устройствах МРАМ и др. Обладающие гигантским магнетосопротивлением многослойные структуры применялись в магниторезистивной оперативной памяти в качестве ячеек, хранящих один бит информации.

Литература

1. Опыты Франка и Герца. [В. И. Гервидс, МИФИ](#)
2. Первый эксперимент, который корректно доказывает нарушение неравенства Белла. <https://geektimes.ru/post/264552/>
3. Квантовые невозмущающие измерения в физике
http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/03_03/QMEASURES.PDF
4. Физические основы измерений. РХТУ им. Менделеева. [Ссылка](#)
5. Физические основы измерений и эталоны. ГТУ «СТАНКИН». [Ссылка](#)
6. Открытие гигантского магнетосопротивления. [Ссылка](#)

Ультрафиолетовая катастрофа

Пользуясь соображениями классической физики, в 1900 году лорд Рэлей, а в 1905 году Джеймс Джинс вывели закон Рэля — Джинса:

$B_\lambda(T) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}$, где $B_\lambda(T)$ - Спектральная плотность энергетической яркости, k_B - постоянная Больцмана, λ - длина волны излучения

Однако, хорошо согласуясь с результатами экспериментов на больших длинах волн, этот закон приводит к «ультрафиолетовой катастрофе» в области коротковолнового излучения. Согласно ему чёрное тело будет излучать бесконечно большое количество энергии в области коротких длин волн, что приведёт к почти мгновенному его охлаждению до абсолютного нуля, что противоречит наблюдениям.

«Ультрафиолетовая катастрофа» была решена введением формулы Планка, выражающей спектральную плотность энергетической яркости как:

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad \text{где } \nu \text{ — частота излучения, } h \text{ — постоянная Планка,}$$

k — постоянная Больцмана

В процессе выводу формулы, Планк сделал допущение, что полная энергия тела состоит из конечного числа порций энергии — квантов.