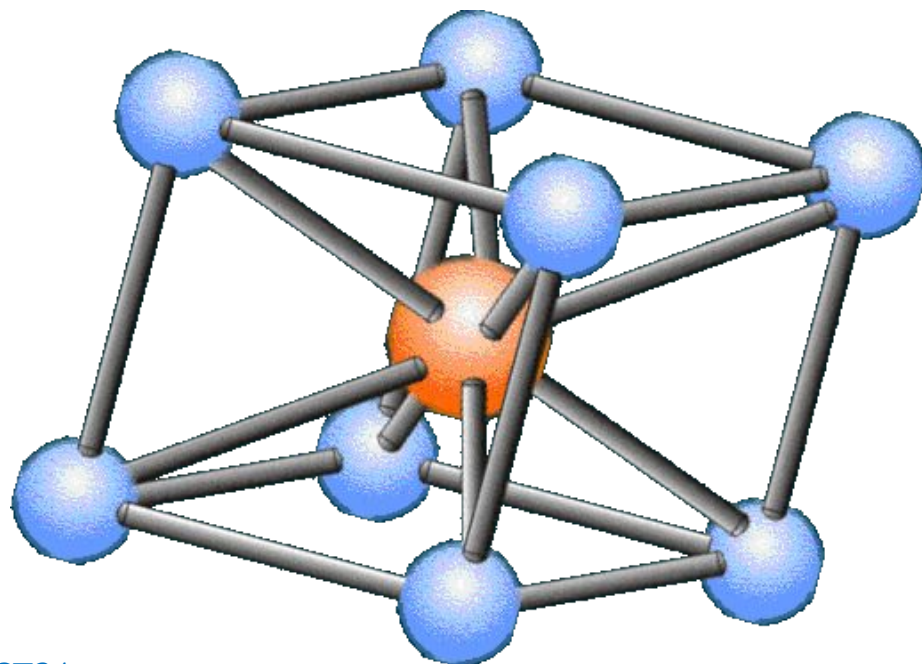


Физика твёрдого тела. Часть I.



«Папа очень хотел, чтобы я стал физиком. Поэтому в детстве он бил меня не ремнём, а током...»

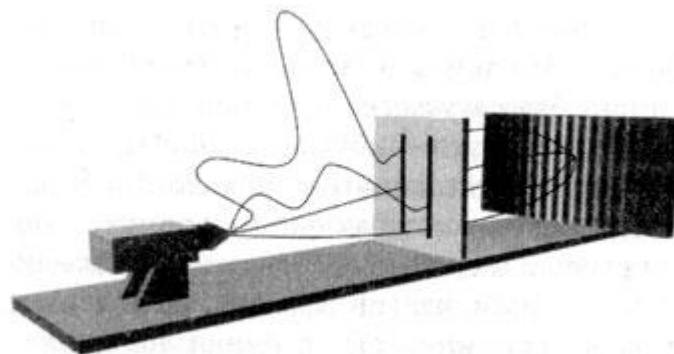
Из воспоминаний физика

Фíзика твёрдого тéла

Фíзика твёрдого тéла — раздел физики конденсированного состояния, задачей которого является описание физических свойств твёрдых тел с точки зрения **их атомарного строения**.

Интенсивно развивалась в XX веке после открытия **квантовой механики**. Развитие стимулировалось широким спектром важных задач прикладного характера, в частности, развитием полупроводниковой техники.

В настоящее время физика твёрдого тела разбилась на большое количество более мелких направлений.



Для начала вспомним, что в обычных условиях все объекты окружающие нас находятся в трех основных агрегатных состояниях: **жидком, твердом и газообразном** (конечно, есть еще и плазма, но с ней в повседневной жизни мы встречаемся не так-то часто). Из них нас сейчас интересует твердое состояние вещества. В отличие от газообразных и жидких тел, твердые тела, в обычных условиях, сохраняют свои объем и форму.

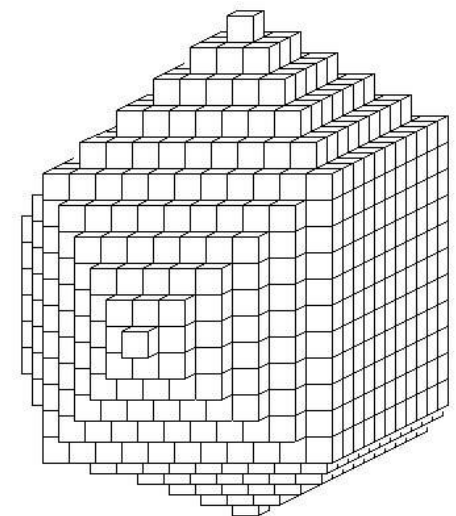
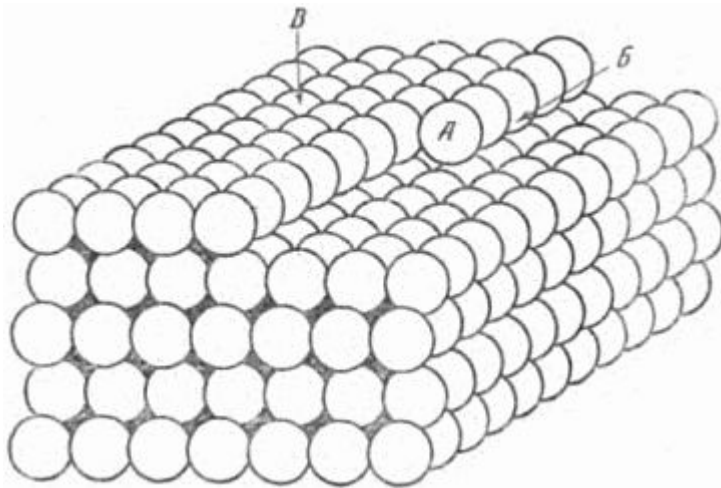
В свою очередь все твердые тела можно разделить на две большие категории: **аморфные и кристаллические тела**. К аморфным веществам относятся стекла, твердые смолы и т.д., а к кристаллическим веществам относятся, например, поваренная соль, медный купорос, графит и т.д.

Кристаллические тела (кристаллы) — это твердые тела, в которых атомы расположены в соответствии с определенным правилом и образуют дальний порядок.

Это значит, что в кристаллах атомы образуют периодически повторяющуюся последовательность вдоль направлений пространственных осей. У аморфных тел дальний порядок отсутствует.

Геометрически правильная внешняя форма кристаллов, образующихся в природных или лабораторных условиях, натолкнула ученых ещё в семнадцатом веке на мысль, что кристаллы образуются посредством регулярного повторения в пространстве одного и того же структурного элемента.

При росте кристалла в идеальных условиях форма его в течение всего роста остается неизменной, как если бы к растущему кристаллу непрерывно присоединялись бы элементарные кирпичики. Сейчас известно, что такими элементарными кирпичиками являются атомы или группы атомов. Кристаллы состоят из атомных рядов, периодически повторяющихся в пространстве и образующих кристаллическую решетку



В 2000 году на севере Мексики на глубине порядка 300 метров под горой Найка (здесь в течение 200 лет добывают цинк, свинец и серебро) шахтеры обнаружили полость с огромными кристаллами. Ученые установили, что самые большие из известных на настоящий момент кристаллов, могли расти порядка одного миллиона лет.

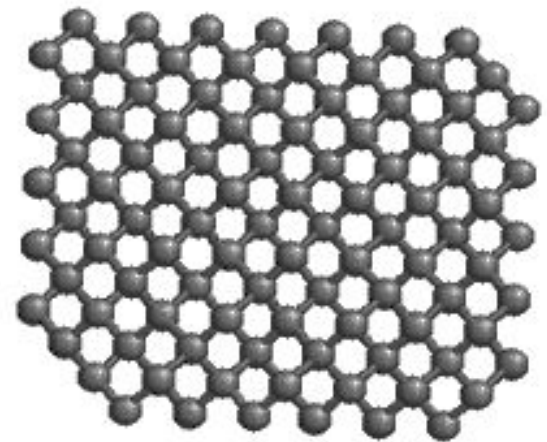




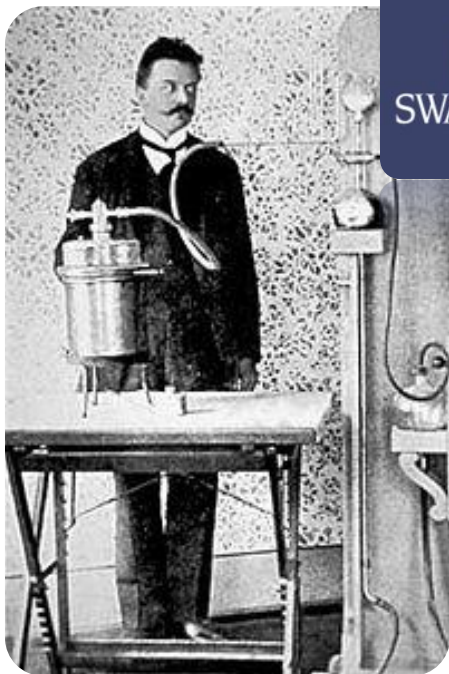
Кристаллофизика

Кристаллы многих минералов и драгоценных камней были известны и описаны ещё несколько тысячелетий назад.

Одна из наиболее ранних зарисовок кристаллов содержится в китайской фармакопее одиннадцатого века нашей эры. Кристаллы кварца из императорской короны, сохранившиеся с 768 года нашей эры, находятся в Сёсоине, сокровищнице японских императоров в Нара. Кристаллом называли вначале только лёд, а затем и кварц, считавшийся окаменевшим льдом. В конце эпохи средневековья слово «кристалл» стало употребляться в более общем смысле.



Криста́ллы (от греч. κρύσταλλος, первоначально — лёд, в дальнейшем — горный хрусталь, кристалл) — твёрдые тела, в которых атомы расположены закономерно, образуя трёхмерно-периодическую пространственную укладку — кристаллическую решётку. Кристаллы — это твёрдые вещества, имеющие естественную внешнюю форму правильных симметричных многогранников, основанную на их внутренней структуре, то есть на одном из нескольких определённых регулярных расположений, составляющих вещество частиц (атомов, молекул, ионов).



В 1892 году Даниель Сваровски изобрел автоматическую ограночную машину. В 1895 году им была основана компания Swarovski, и его машину впервые установили на ограночную фабрику в Ваттенс — здесь он мог использовать в своих интересах местную гидроэлектростанцию для энергоёмких процессов размола и переработки хрусталя.

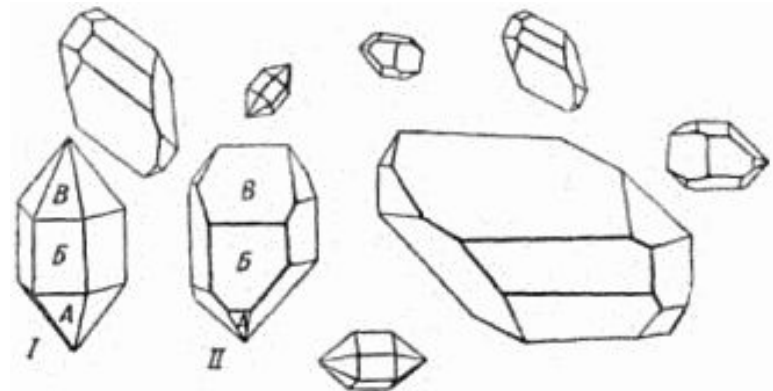
Внешне особенность кристалла выражается в окаймлении кристаллов **плоскими гранями**, которые пересекаются по прямым рёбрам. У разных образцов кристаллов одного и того же вещества может быть представлено (или, как говорят, могут развиваться) различное число граней одного «сорта», а также различное число самих «сортов» граней. И всё же такие кристаллики похожи друг на друга, как близкие родственники, как близнецы. В чём же заключается их сходство? В XVII и XVIII веках многие учёные независимо друг от друга искали эти родственные черты.

Рассмотрим внимательно большое количество кристаллов одного и того же вещества. Не все образцы будут представлять собой правильные фигуры. Некоторые кристаллики будут просто обломками, другие будут иметь одну, две грани «ненормально» развитыми. Однако ряд образцов покажется нам достаточно идеальным. Отберём их из общей кучи и зарисуем. Мы увидим тогда, что имеются кристаллы, отличающиеся друг от друга главным образом размером. Если маленький пропорционально увеличить, то он будет в точности повторять большой. Наряду с такими кристалликами мы найдём и другие, чем-то похожие друг на друга, но уже не совпадающие ни при каком пропорциональном изменении размеров.

Одним из учёных, открывших закон, объясняющий это сходство, – закон постоянства углов в кристаллах – был Михаил Васильевич Ломоносов. Изучая драгоценные камни, он неизменно находил **одни и те же углы между их гранями**.

Посмотрите на рисунок, где изображён ряд кристаллов кварца. Все эти кристаллики – близкие родственники. Их можно сделать и совсем одинаковыми, сошлифовывая грани на различную глубину параллельно самим себе. Легко видеть, что таким способом, например, кристалл II может быть сделан совершенно таким же, как кристалл I. Эта возможность следует из того замечательного обстоятельства, что углы между сходственными гранями образцов одинаковы, например, между гранями А и Б, Б и В и т.д.

В этом равенстве углов и заключается «семейное» сходство кристаллов. При сошлифовывании граней параллельно самим себе форма кристалла изменяется, но углы между гранями сохраняют своё значение



При росте кристалла в зависимости от ряда случайностей одни грани могут попасть в условия *более благоприятные*, другие в менее удобные для увеличения своих размеров.

Кристалл вырастет неправильным, родственные взаимоотношения между выросшими в разных условиях образцами станут незаметными, но **углы между сходственными гранями всех кристаллов изучаемого вещества будут всегда одинаковы**. Форма кристалла случайна, а углы между гранями отвечают (и мы дальше поймём, почему) его внутренней природе.

Этот очень важный закон природы помогает нам узнавать, с каким веществом мы имеем дело. Два образца могут быть внешне очень непохожими, но если измерение показывает, что углы между гранями одинаковы, то имеются серьёзные основания полагать, что мы имеем дело с **одним и тем же веществом**. Напротив, отсутствие совпадающих углов между гранями говорит за то, что кристаллы принадлежат разным веществам.

Анализ вещества, построенный на этой идее, был разработан творцом современной кристаллографии – так называется наука о строении и свойствах кристаллов – русским учёным **Евграфом Степановичем Фёдоровым**.

Евграф Степанович Фёдоров (1853—1919) — русский кристаллограф, минералог и математик. Крупнейшее достижение Е. С. Фёдорова — строгий вывод всех возможных пространственных групп (видов) симметрии. Тем самым Федоров описал симметрии всего разнообразия кристаллических структур. В то же время он фактически решил известную с древности задачу о возможных симметричных фигурах



Страстная, протестующая против насилия и несправедливости натура Е. С. Фёдорова приводит его в партию "Земля и Воля"; членом её он становится ещё в 1876 г. в бытность свою студентом Технологического института. Е. С. Фёдоров принял активное участие в подпольной работе. В 1877 году он по заданию партии, с целью установления связи с заграничными революционными организациями, объезжает Францию, Бельгию и Германию, зарабатывая средства для жизни тяжёлым физическим трудом. В Германии он знакомится с В. Либкнехтом и А. Бебелем и под их влиянием проникается социал-демократическими идеями. Он принимает участие в немецком рабочем движении, работает наборщиком социал-демократической газеты.

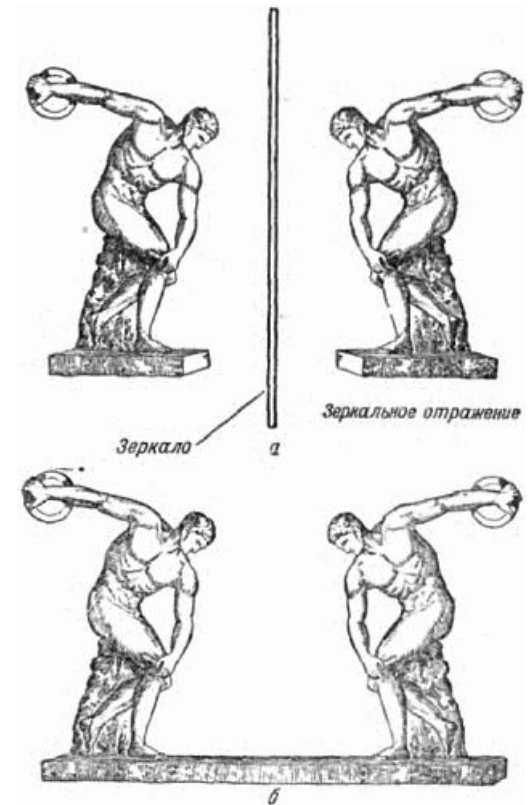
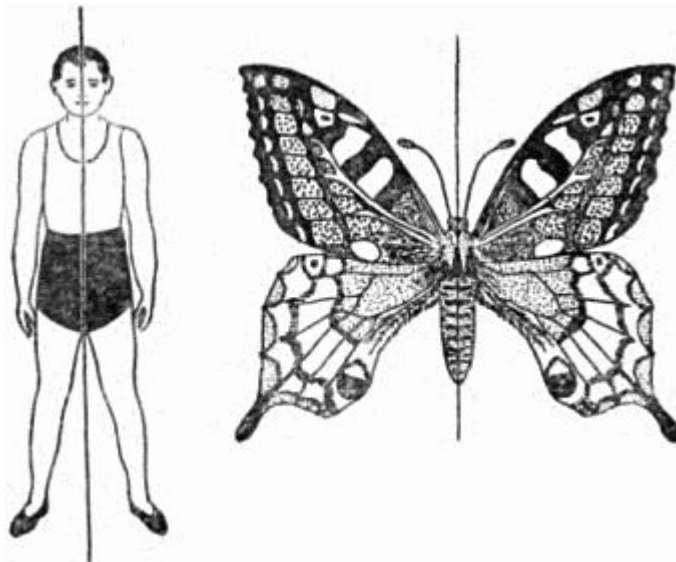
Е.С. Фёдоров не только указал на возможность определения вещества по форме кристалла, но и составил вместе со своими учениками книгу «Царство кристаллов», плод гигантского труда, длившегося свыше 10 лет. Эта книга содержит в себе основы современной кристаллографии и справочный материал о величинах углов между гранями у огромного количества кристаллов.

Для анализа вещества методом Е.С. Фёдорова требуется иметь **маленький кристаллик**, размером хоть с песчинку. У этого кристаллика мы измеряем на специальных приборах – **гониометрах** – углы между гранями. Затем, пользуясь правилами, разработанными Фёдоровым, мы определяем, к какой группе веществ принадлежит исследуемый кристалл, и по совпадению данных измерения с цифрами, приведёнными в «Царстве кристаллов», находим, с каким веществом мы имеем дело. Разумеется, анализ не может быть проведён в том случае, если данное вещество никогда не изучалось и сведений о нём нет в книге.

Анализ методом Е.С. Фёдорова оказал уже не мало услуг промышленности. Например, в 1938 году с помощью определителя кристаллов было обнаружено присутствие в россыпях на Урале важнейшей оловянной руды – касситерита, кристаллы которого были ранее ошибочно отнесены к другому минералу – рутилу (окись титана).

Симметрия

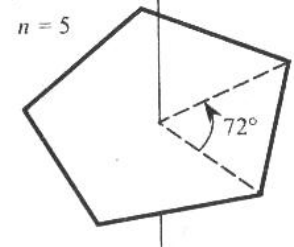
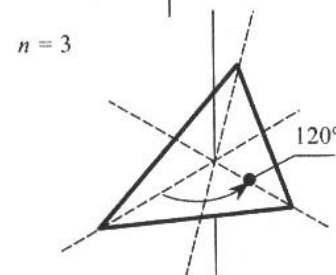
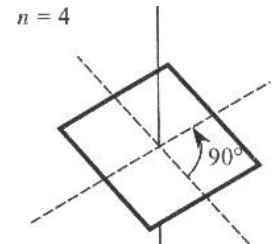
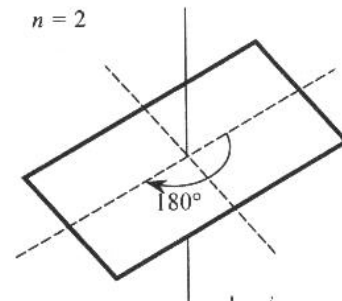
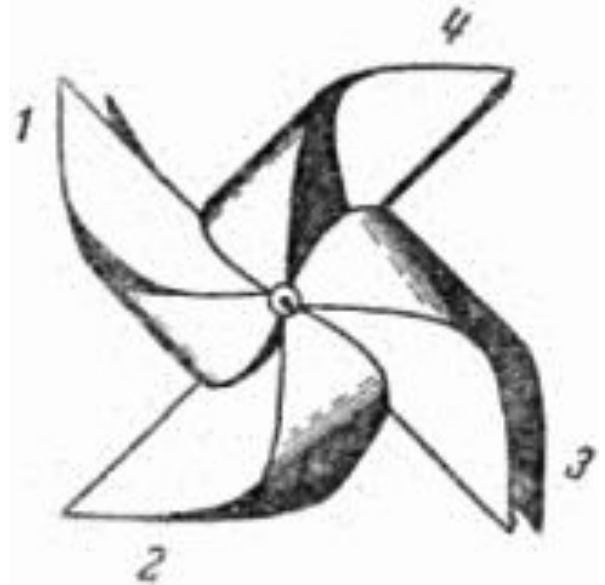
На рисунке правая часть скульптуры в точности совпадёт с отражением левой её части. Эта симметричная фигура обладает вертикальной **плоскостью зеркальной симметрии**, которая проходит через середину постамента. Плоскость симметрии – мысленная плоскость, но мы её отчётливо ощущаем, рассматривая симметрично построенное тело.



На рисунке изображена детская бумажная вертушка. Она тоже симметрична, но плоскость симметрии через неё провести нельзя. В чём же тогда заключается симметрия этой фигурки?

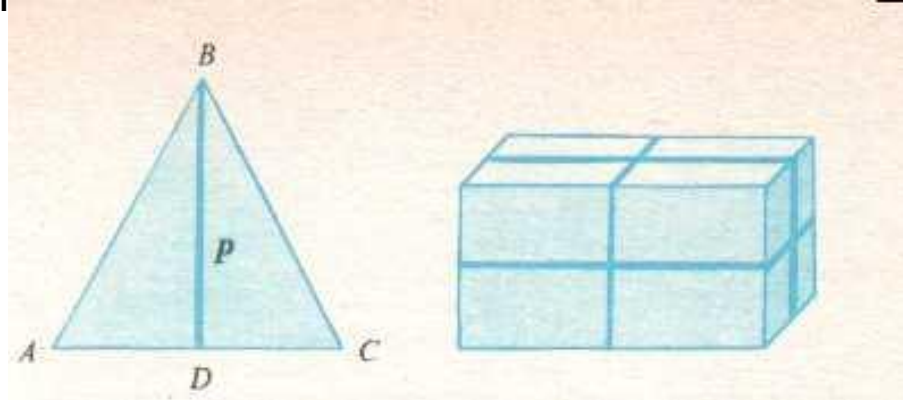
Повернём вертушку на прямой угол, то есть на $1/4$ окружности; тогда крыло 1 встанет на то место, где было крыло 2; крыло 2 – на место 3; 3 – на место 4 и 4 – на место 1. Новое положение неотлично от предыдущего. Про такую фигурку мы скажем так: она обладает *осью симметрии* и притом осью симметрии 4-го порядка.

Другие фигуры могут обладать осями симметрии других порядков.

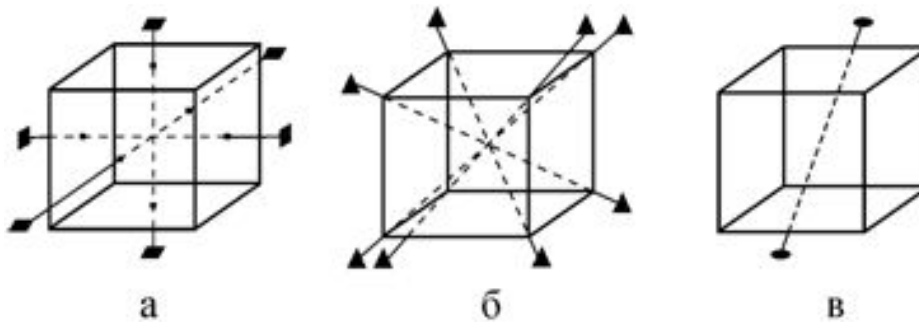


Фигура обладает симметрией, если существует движение (преобразование не тождественное), переводящее ее в себя. К фундаментальным понятиям симметрии относятся **плоскость симметрии, ось симметрии, центр симметрии**. Можно также рассматривать **трансляционную симметрию**.

Плоскостью симметрии P называется такая плоскость, которая делит фигуру на две зеркально равные части, расположенные друг относительно друга так, как предмет и его зеркальное отражение. Например, изображенный на рис. слева равнобедренный треугольник ABC высотой BD разделяется на две зеркально равные половины ABD и BCD ; при этом высота BD является "следом" плоскости симметрии P , перпендикулярной плоскости треугольника. На рис. справа изображен также прямоугольный параллелепипед (кирпичик, спичечный коробок), который имеет три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии $3P$. Нетрудно установить, что куб обладает девятью плоскостями симметрии - $9P$.

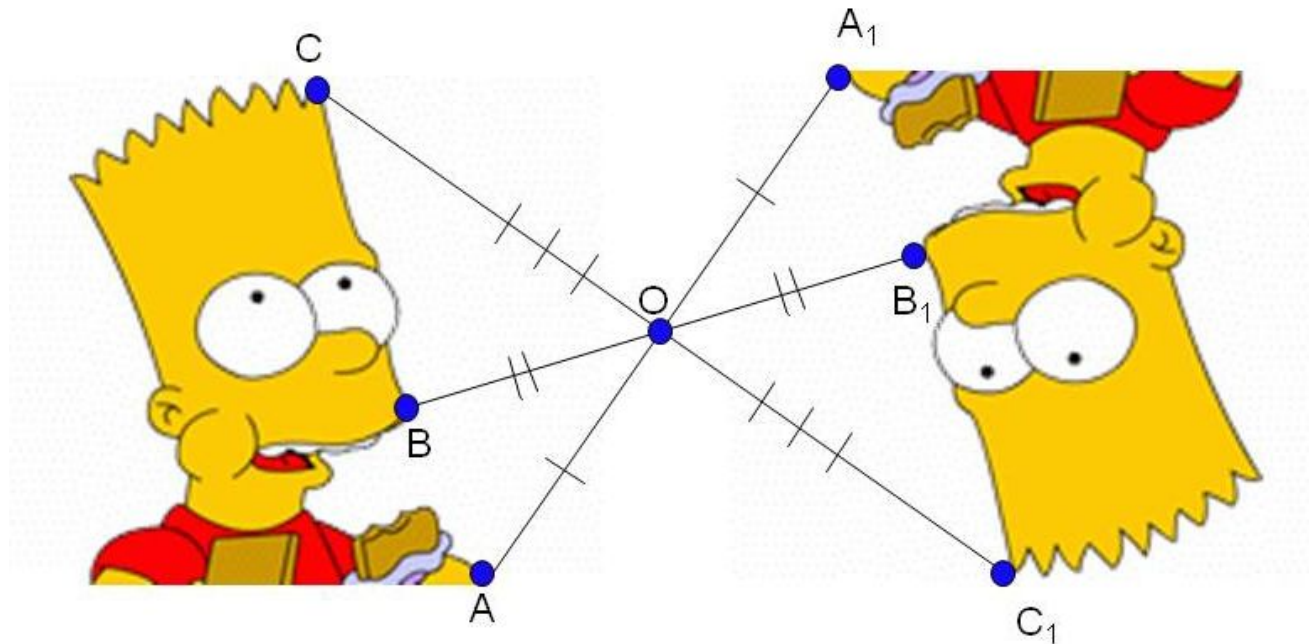


Осью симметрии L называется такая прямая линия, вокруг которой симметричная фигура может быть повернута несколько раз таким образом, что каждый раз фигура "самосовмещается" сама с собой в пространстве. Число таких поворотов вокруг оси симметрии называется порядком оси. Например, равносторонний треугольник имеет ось симметрии L_3 , то есть существуют три способа поворота треугольника вокруг оси, при котором происходит его "самосовмещение". Ясно, что квадрат имеет ось симметрии L_4 , а пентагон - L_5 . Конус также имеет ось симметрии, причем, поскольку число поворотов конуса вокруг своей оси симметрии, приводящих к "самосовмещению" бесконечно, то говорят, что конус имеет ось симметрии типа L_∞ .



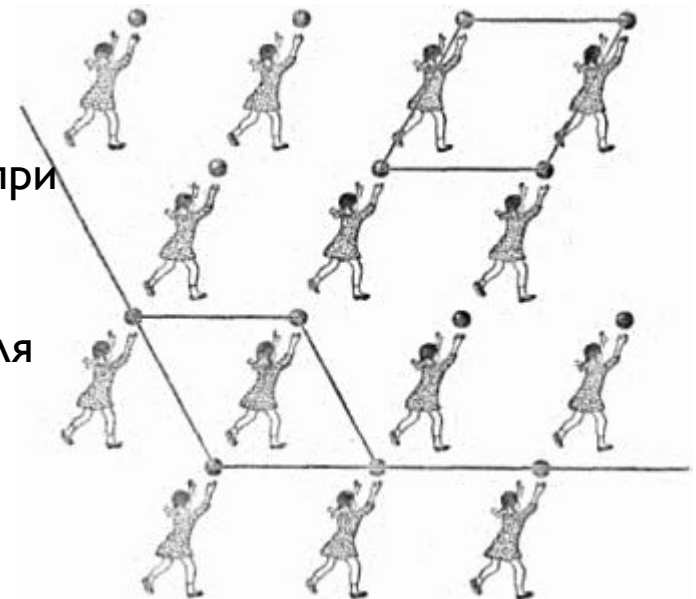
Наконец, **центром симметрии** C называется такая особая точка внутри фигуры, характеризующаяся тем, что любая проведенная через точку прямая по обе стороны от нее и на равных расстояниях встречает одинаковые (соответственные) точки фигуры.

Центр симметрии отрезка – его середина; параллелограмм или параллелепипеда – точка пересечения диагоналей; окружности или сферы – ее центр. . "Идеальным" примером такой фигуры является шар, центр которого и является его центром симметрии.



Чтобы понять, что такое **трансляционная симметрия**, нам придётся поговорить... об обоях. Посмотрите на рисунок. На нём изображена девочка, играющая в мяч. И не одна девочка, а много совершенно одинаковых фигурок. Найдём на этом рисунке обоев тот наименьший кусок, который надо нарисовать художнику, иначе говоря, тот кусок, простым перекалыванием которого можно составить все обои. Чтобы выделить такой кусок, проведём из любой точки рисунка, например из центра мячика, две линии, соединяющие выбранный мячик с двумя соседними. На этих линиях можно построить, как это видно на нашем рисунке, параллелограмм. Совершенно ясно, что перекалываниям этого кусочка в направлении основных исходных линий мы можем составить весь рисунок обоев.

Трансляционная симметрия — тип симметрии, при которой свойства рассматриваемой системы не изменяются при сдвиге на определённый вектор, который называется вектором трансляции. Трансляционная симметрия свойственна для кристаллов. В этом случае векторы трансляции не произвольны, хотя их существует бесконечное число.



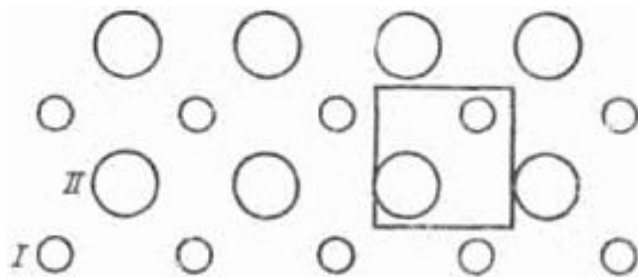
Симметрия широко встречается в объектах живой и неживой природы. Например, симметрия в химии отражается в геометрической конфигурации молекул. Так, например, молекула метана CH_4 обладает симметрией тетраэдра.

Понятие "симметрии" является центральным при исследовании кристаллов. При этом симметрия внешних форм кристаллов определяется симметрией его атомного строения, которая обуславливает и симметрию физических свойств кристалла.

Особенно широко понятие "симметрии" применительно к физическим законам используется в современной физике. Если законы, устанавливающие соотношения между величинами или определяющие изменение этих величин со временем, не меняются **при определенных операциях (преобразованиях), которым может быть подвергнута система**, то говорят, что эти законы обладают симметрией (или **инвариантны**) относительно данных преобразований. Например, закон тяготения действует в любой точки пространства, то есть он является инвариантным по отношению переноса системы как целого в пространстве.

Какое же отношение имеют обои к кристаллу?

Каждое тело, в том числе и кристалл, состоит из атомов. Простые вещества состоят из одинаковых атомов, сложные – из атомов двух или нескольких сортов. Предположим, что мы могли бы в сверхмощный микроскоп рассмотреть поверхность кристалла поваренной соли и увидеть центры атомов. Рисунок показывает, что атомы расположены вдоль грани кристалла, как узор обоев.



Кристалл представляет собой «пространственные обои».

Пространственные, то есть объёмные, а не плоские элементарные ячейки – это «кирпичи», прикладыванием которых друг к другу в пространстве строится кристалл.

Структура кристалла – это пространственное расположение его атомов (или молекул). Если с каждой группой атомов(молекул) связать точку в пространстве, то такая совокупность точек называется **кристаллической решеткой**.

Сколько же способов построения «пространственных обоев» из элементарных кусков? Эта сложная математическая задача была также решена Е.С. Фёдоровым. Он доказал, что должны существовать 230 способов построения кристалла или, как сейчас говорим, 230 фёдоровских групп. Открытие Е.С. Фёдорова принадлежит к величайшим достижениям русской науки. Начатые примерно через 20 лет после вывода Фёдорова опытные проверки его теории – они стали возможными лишь после открытия рентгеновского структурного анализа – привели к блестящему её подтверждению. Не было найдено ни одного кристалла, который не принадлежал бы к той или иной фёдоровской группе.

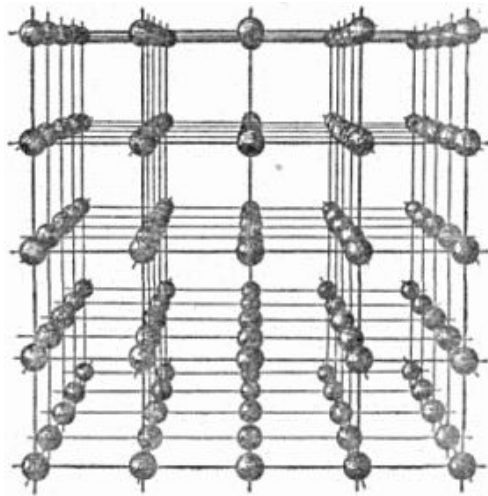
Существуют простые кристаллы, построенные из атомов одного сорта. Например, алмаз – это чистый углерод. Кристаллы поваренной соли состоят из ионов двух сортов – натрия и хлора. Более сложные кристаллы могут быть построены из молекул, которые в свою очередь состоят из атомов многих сортов.

Однако в кристалле всегда можно выделить наименьшую повторяющуюся группу атомов (в простейшем случае это будет один атом), что соответствует повторяющейся на плоских обоях рисунка *одной* фигурке.

В кристалле всегда можно найти **элементарную ячейку**, – то есть такой *параллелепипед* (для плоских обоев это был прямой или косоугольный параллелограмм), последовательным перемещением которого параллельно самому себе на расстояния, равные его рёбрам, можно воспроизвести весь кристалл.

Вершины ячейки кристаллографы называют *узлами*. Обычно их удобнее всего размещать в центрах атомов кристалла

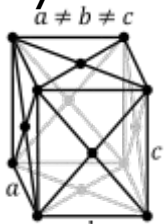
Если изобразить в пространстве строение кристалла, отмечая только узлы и соединяющие их линии, то возникнет своего рода «скелет» кристалла. Такое изображение кристалла называется **кристаллической решёткой**.



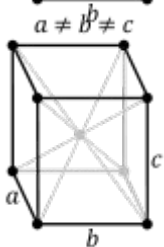
Основная особенность кристаллической структуры заключается в её повторяемости через строго одинаковые расстояния. Предположим, что мы сделали прогулку вдоль одной из проволочек рисунка. Выйдя из узла и продвигаясь вдоль проволоки, мы попадали бы всё в новые «местности». Но наши новые впечатления продолжались бы лишь до следующего узла. Начиная же от него, мы увидели бы полное повторение «пейзажа», уже знакомого нам по путешествию от первого до второго узла.

Двигаясь в разных направлениях внутри кристалла, мы наблюдали бы разные картины, но во всех случаях, пройдя некоторое расстояние, мы попадали бы в места, неотличимые от уже пройденных, и это повторялось бы всё время через равные промежутки.

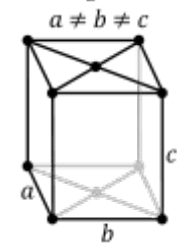
Решетка Браве является математической моделью, отражающей трансляционную симметрию кристалла. Все многообразие кристаллов может быть описано с помощью 14 типов кристаллических решеток – **решеток Браве**. Их принято группировать в семь систем – сингоний, различающихся видом элементарной ячейки: триклинную, моноклинную, ромбическую, тетрагональную, тригональную, гексагональную и кубическую. Ниже приведены типы ячеек



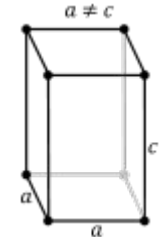
Гранецентрированная



Объёмно-центрированная



Базо-центрированная



Примитивная



Огюст Браве́ (1811 - 1863) — французский физик и один из основателей кристаллографии. Положил начало геометрической теории структуры кристаллов, найдя в 1848 году основные виды пространственных решёток (решётка Браве) и высказав гипотезу о том, что они построены из закономерно расположенных в пространстве точек.

Решетка Браве является **математической моделью**, отражающей трансляционную симметрию кристалла. В общем случае, решётка Браве не совпадает с реальным кристаллом, а узлы не соответствуют атомам. Поэтому следует отличать кристаллическую решётку и решётку Браве.

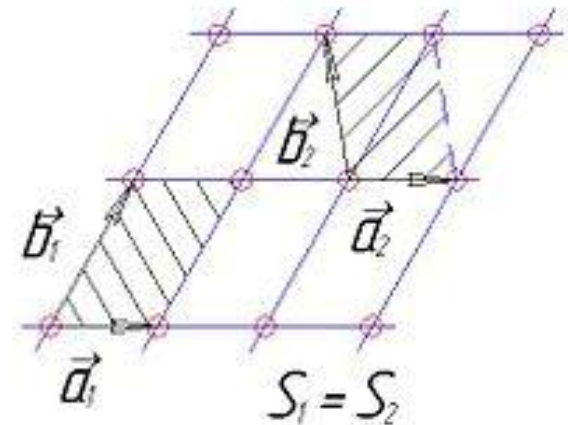
Понятие решётки Браве связано с *основными трансляционными векторами*. Основным трансляционным вектором называется минимальный в данном направлении вектор перехода из данной точки в ближайшую эквивалентную.

Задав нулевую точку, строим совокупность точек по правилу:

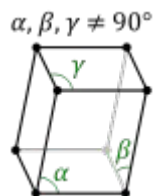
$$\vec{a} = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3$$

Где n_1, n_2, n_3 - произвольные целые числа.

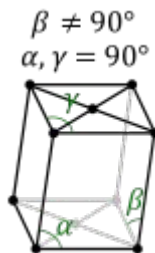
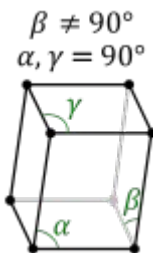
Получившаяся решётка - решётка Браве.



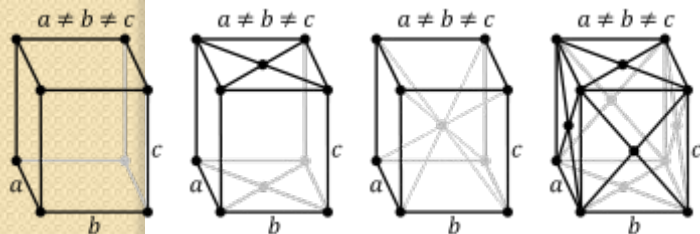
В зависимости от пространственной симметрии, все кристаллические решётки подразделяются на ряд кристаллических систем. По форме элементарной ячейки они могут быть разбиты на семь **сингоний**. Все возможные сочетания имеющихся в кристаллической решётке поворотных осей симметрии и зеркальных плоскостей симметрии приводят к делению кристаллов на 32 класса симметрии, а с учётом винтовых осей симметрии и скользящих плоскостей симметрии на 230 пространственных групп. (Сингония (от греч. $\sigma\upsilon\nu$, «согласно, вместе, рядом», и $\gamma\omega\nu\acute{\iota}\alpha$, «угол» — дословно «сходноугольность») — классификация кристаллографических групп симметрии, кристаллов и кристаллических решёток в зависимости от системы координат (координатного репера). Группы симметрии с единой координатной системой объединяются в одну сингонию.)



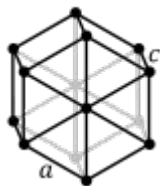
триклинная сингония — наименьшая симметрия, нет одинаковых углов, нет осей одинаковой длины;



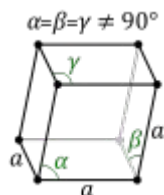
моноклинная сингония — два прямых угла, нет осей одинаковой длины



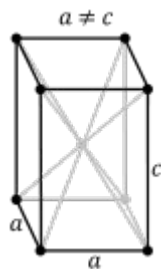
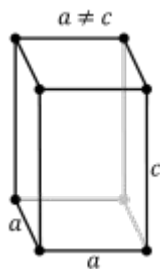
ромбическая сингония — три прямых угла
нет осей одинаковой длины;



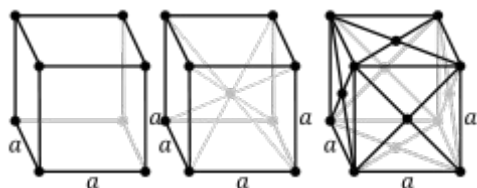
гексагональная сингония — две оси
одинаковой длины в одной плоскости под
углом 120° , третья ось под прямым углом;



тригональная сингония — три оси
одинаковой длины и три равных угла, не
равных 90° ;

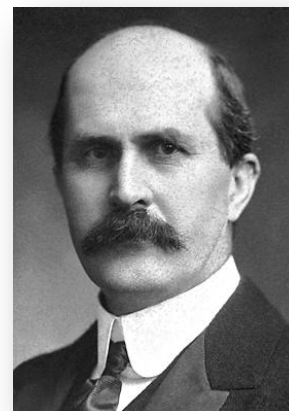


тетрагональная сингония — две оси
одинаковой длины, три прямых угла;

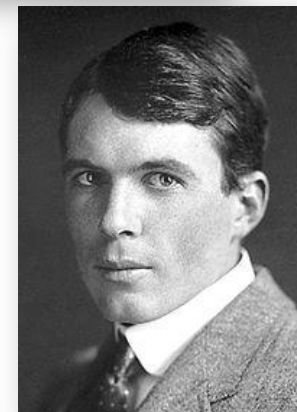


кубическая сингония — высшая степень
симметрии, три оси одинаковой длины под
прямым углом.

Сэр Уильям Генри Брэгг (1862-1942) — английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1915 г. (совместно со своим сыном У. Л. Брэггом).



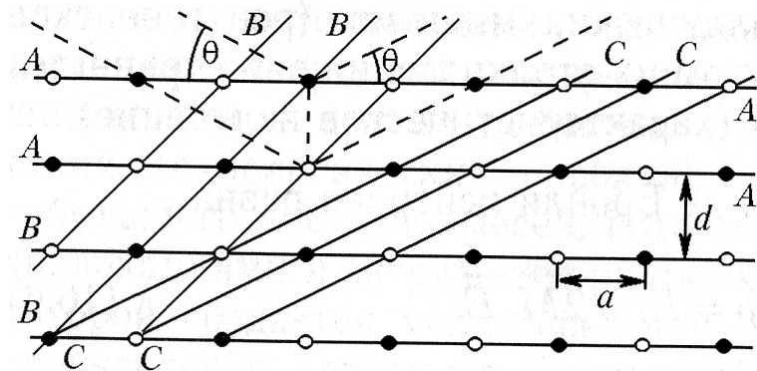
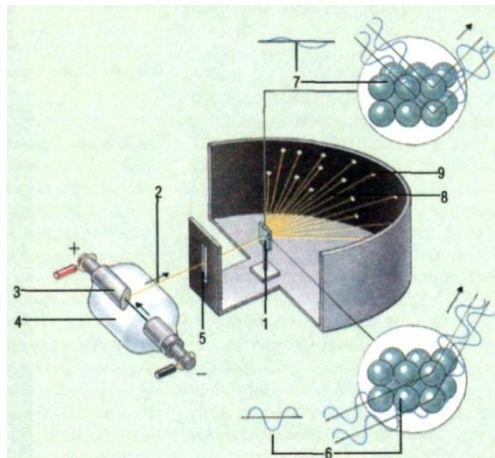
Сэр Уильям Лоренс Брэгг OBE (1890 — 1971) — австралийский физик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1915 год (совместно со своим отцом Уильямом Генри Брэггом). Самый молодой нобелевский лауреат по физике за всю историю премии.



Геор́гий (Ю́рий) Ви́кторович Вульф (1863 — 1925) — советский кристаллограф, член-корреспондент РАН (1921).



Толкование рентгеновской дифракционной картины, полученной в опыте Лауэ, оказалось довольно сложным, и разрешили эту проблему независимо друг от друга англичанин У.Л. Брэгг, сын известного физика того времени У.Г. Брэгга, и русский кристаллограф Ю.В. Вульф. В 1913 г. они вывели закон отражения рентгеновских лучей от кристалла, рассмотрев рассеяние рентгеновских лучей как отражение от атомных плоскостей, которые условно можно провести через центры атомов, образующих кристалл. Атомы при этом считались неподвижными, и кристалл представлялся в виде семейства параллельных плоскостей, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга. Предполагалось, что число атомных плоскостей велико, а преломления нет.

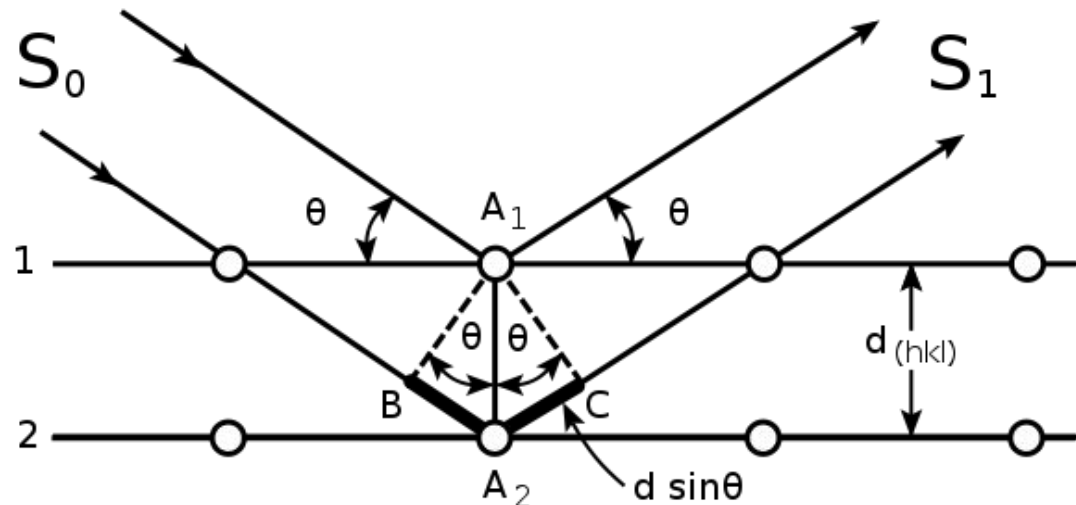


Простейший случай Брэгговской дифракции возникает при рассеянии видимого света на дифракционной решётке.

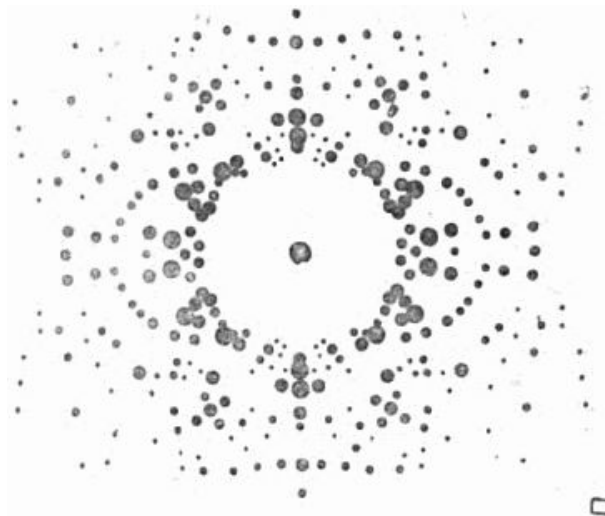
Аналогичное явление наблюдается при рассеянии рентгеновского излучения, электронов, нейтронов и т. п. на кристаллической решётке. Интенсивные пики рассеяния наблюдаются тогда, когда выполняется условие Вульфа — Брэгга.

Для дифракционной решетки с периодом d это условие можно записать в виде:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$



Все современные данные о внутреннем строении кристаллов получены при помощи рентгеновского структурного анализа. Маленький, размером 0,5–1 мм, кристаллик ставится на пути узкого рентгеновского луча. За кристаллом помещается фотопластинка. Наряду с прошедшим сквозь кристалл лучом возникает ряд отклонённых лучей. Явление это носит название дифракции.



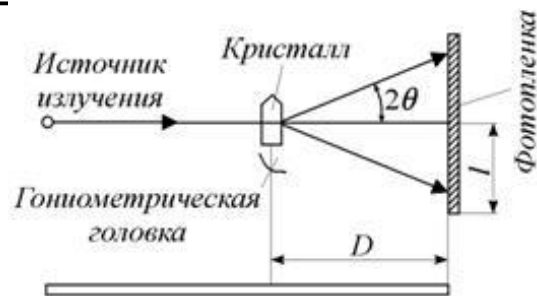
Важной датой в истории физики твердого тела является 8 июня 1912 года. В этот день в Баварской Академии наук в Мюнхене слушался доклад «Интерференция рентгеновских лучей». В первой части доклада **Лауэ** выступил с изложением элементарной теории дифракции рентгеновских лучей на периодическом атомном ряду. Во второй части доклада **Фридрих и Книппинг** сообщили о первых экспериментальных наблюдениях дифракции рентгеновских лучей в кристаллах. Этой работой было показано, что рентгеновские лучи являются волнами, так как они способны дифрагировать. Работа неопровержимо доказала также, что кристаллы состоят из периодических рядов атомов. С этого дня началась та физика твердого тела, какой мы знаем её сегодня.

Макс фон Лауэ (1879 — 1960) — немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1914 году «за открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах»

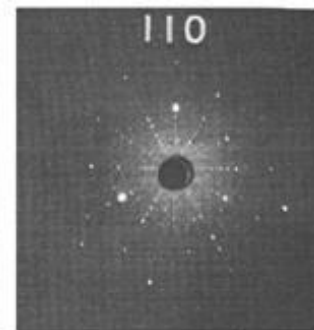
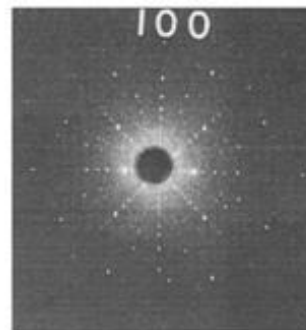
Метод Лауэ

Немонохроматический пучок рентгеновских лучей (электронов или нейтронов) направляется на неподвижно закрепленный монокристалл. Каждое пятно на *лауэграмме* соответствует плоскости решетки, ориентация которой полностью определяется направлением дифракционного луча.

(а – схема метода Лауэ; б – лауэграмма
монокристалла)



а



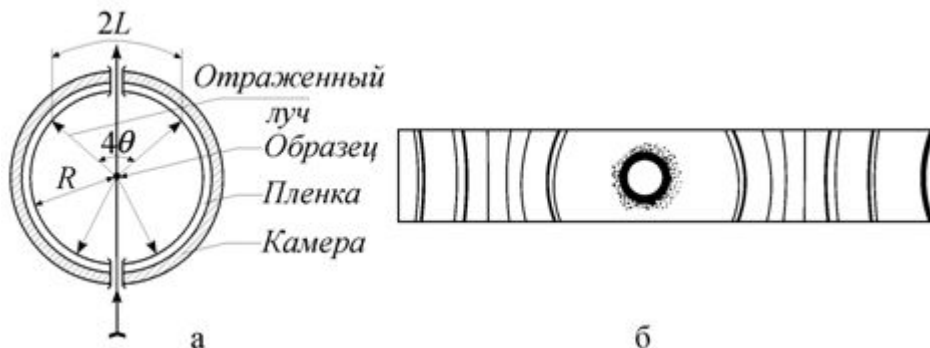
б



Пётр Йозеф Вильгельм Дебай (1884—1966) — голландский физик, лауреат Нобелевской премии по химии за 1936 год.

Метод порошка (Дебая)

Пучок монохроматических лучей падает на поликристаллический образец. Падающие лучи отражаются от тех кристаллитов, которые по отношению к направлению падающего пучка оказываются ориентированы так, что выполняется условие Вульфа-Брэггов (а – схема съемки поликристалла в цилиндрической камере; б – рентгенограмма на фотопленке, полученная при съемке в цилиндрической камере)



Спасибо за
внимание!

