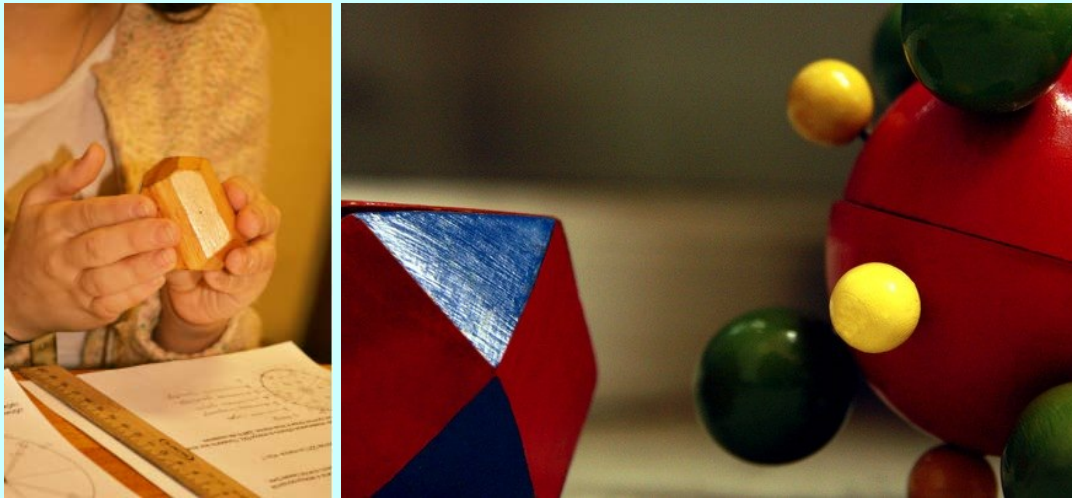


# КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

(краткий – 1 семестр  
и **полный курс** – 1 и 2 семестр)



**Полный** - читается студентам  
**геохимического** потока Геологического  
факультета МГУ (105 +112)

### 3 важные теоремы и аксиомы:

1) МГУ – лучший вуз страны  
(без доказательства)

2) Геологический факультет – самый дружный  
и полезный факультет в МГУ и вообще...  
(обосновано 31-ого августа на вручении  
студенческих)

3) Кристаллография – самая *изящная* и  
*красивая* наука о веществе Земли  
(начнем доказывать сегодня)

*Еще раз знакомимся:*

**Лектор:**

Еремин Николай Николаевич



декан,  
зав. кафедрой кристаллографии и  
кристаллохимии,  
Член-корреспондент РАН  
доктор химических наук

(+ часто буду на семинарах)

Полезно знать кого как зовут  
Шпаргалка (по всем) будет у 426 на стенде  
**Первые преподаватели семинарских занятий**



Старший преп.  
*Напрасников  
Даниил  
Алексеевич*  
102 группа



Доцент  
*Гурбанова  
Ольга  
Александровна*  
112, 119 группы



Доцент  
*Еремина  
Татьяна  
Александровна*  
105, 103 группы



Н.С.  
*Топникова  
Анастасия  
Павловна*  
101 группа

**НАЧАЛО СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ – с 4 сентября!!!**

**1 семестр :**  
**16 лекций (еженедельно)**  
**16 семинаров (еженедельно)**  
**зачет (экзамен)**



**2 семестр :**  
**12 ЛЕКЦИОННО-ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**  
**экзамен по всему курсу после 2-ого**  
**семестра**

# Аннотация курса, лекционный и справочный материал, интерактивы (в свое время) доступны на страницах курса:

<http://cryst.geol.msu.ru/courses/crgraf/index.php> - краткий курс

<http://cryst.geol.msu.ru/courses/crgraf/index2.php> - полный курс

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА, ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра кристаллографии и кристаллохимии

Информация о кафедре  
Исторический обзор  
Страница памяти  
Сотрудники, аспиранты  
Научная работа  
Публикации сотрудников  
Информация для аспирантов  
Информация для магистров  
Информация для студентов  
Учебный план  
Учебные курсы  
Учебные пособия  
Практики  
Абитуриенту  
Новости  
Конференции  
Полезные ресурсы  
Спорт на кафедре

2,510 Pageviews  
Jan 19th - Feb 19th

Профком  
ф-та

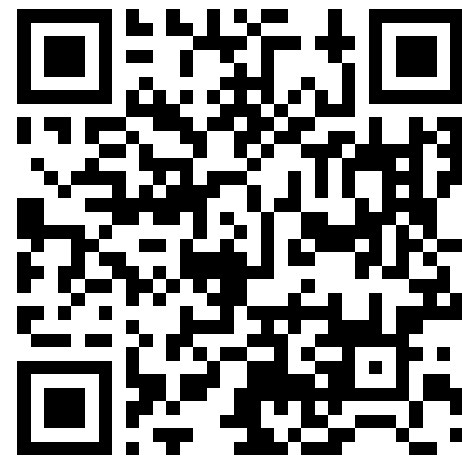
Популярная геология

geokniga

Рейтинг@Mail.ru

### Учебные курсы кафедры кристаллографии и кристаллохимии

| Наименование дисциплины                                                                                                                                                | Кол-во часов ауд |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>Общесекундарные курсы</b>                                                                                                                                           |                  |
| <b>КРИСТАЛЛОГРАФИЯ - КРАТКИЙ КУРС, ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТОК</b> (для групп 101, 102, 103, 119)                                                                              | 54               |
| <b>Современные проблемы геологии</b>                                                                                                                                   | 1                |
| <b>Современные проблемы геохимических наук</b>                                                                                                                         | 24               |
| <b>Курсы специальности «Геохимия» бакалавриат - группы 105, 112, 205, 212</b>                                                                                          |                  |
| <b>КРИСТАЛЛОГРАФИЯ - ПОЛНЫЙ КУРС, ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПОТОК</b> (для групп 105 и 112)                                                                                        | 102              |
| <b>КРИСТАЛЛОХИМИЯ - ПОЛНЫЙ КУРС, ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПОТОК 2 и 3 семестры</b>                                                                                                | 60               |
| <b>МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ</b> (для групп 205 и 212)                                                                                                          | 72               |
| <b>Курсы для совместного университета МГУ - ППИ в г. Шэньчжэнь (ФНМ)</b>                                                                                               |                  |
| <b>Структурная химия и кристаллохимия</b> (для бакалавров материаловедческого направления совместного университета МГУ-ППИ)                                            | 108              |
| <b>Курсы для филиала МГУ в г. Душанбе (Естественно-научный факультет)</b>                                                                                              |                  |
| <b>КРИСТАЛЛОГРАФИЯ</b> (для Геологического направления филиала МГУ в г. Душанбе)                                                                                       | 28               |
| <b>КРИСТАЛЛОХИМИЯ</b> (для направления Физика-Химия и Механика Материалов филиала МГУ в г. Душанбе)                                                                    | 48               |
| <b>Отдельные главы структурной химии. 7-ой семестр осень 2024 - 8 семестр весна 2025</b> (для направления Физика-Химия и Механика Материалов филиала МГУ в г. Душанбе) | 76/180           |
| <b>Межфакультетские курсы для студентов НЕ Геологического факультета МГУ</b>                                                                                           |                  |
| <b>Симметрия кристаллического микромира с применением алгоритмов машинного обучения</b> Страница курса на сайте кафедры                                                | 28               |
| <b>Симметрия кристаллов</b> Страница курса на сайте кафедры                                                                                                            | 26               |
| <b>Курсы для бакалавров кафедры кристаллографии и кристаллохимии (группы 314 и 414)</b>                                                                                |                  |
| <b>ТЕОРИЯ СИММЕТРИИ КРИСТАЛЛОВ</b>                                                                                                                                     | 135              |
| <b>РОСТ КРИСТАЛЛОВ</b>                                                                                                                                                 | 162              |
| <b>РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ</b>                                                                                                                                      | 131              |
| <b>Инструментальные методы исследования кристаллического вещества</b>                                                                                                  | 32               |
| <b>Рабочее пространство кристаллохимии</b>                                                                                                                             | 26               |
| <b>Математическое моделирование кристаллических структур</b>                                                                                                           | 28               |
| <b>Инфракрасная и масс-спектрометрическая спектроскопия минералов</b>                                                                                                  | 26               |
| <b>Курсы магистерской программы «Кристаллография и кристаллохимия» (группы M114 и M214)</b>                                                                            |                  |
| <b>РОСТ КРИСТАЛЛОВ: малоразмерные монокристаллические материалы</b>                                                                                                    | 94               |
| <b>Физическая и теоретическая кристаллохимия. Суперкомпьютерные расчеты</b>                                                                                            | 52               |
| <b>Структура и свойства кристаллов</b>                                                                                                                                 | 28               |
| <b>Анионоцентрированная кристаллохимия</b>                                                                                                                             | 28               |
| <b>АНТИСИММЕТРИЯ И МНОГОЦЕНТРАЯ СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ</b>                                                                                                               | 78               |



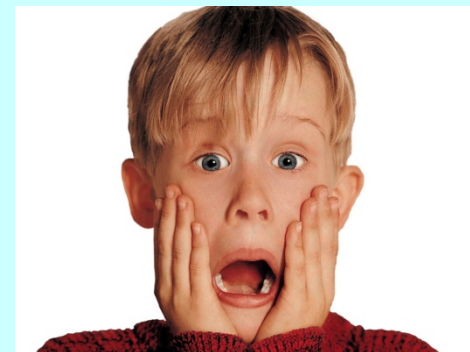
# С чего начнем?

**Анонимный  
мини опрос:**

«Разделите круг на две  
половинки одной линией»

**С чего  
продолжим?**

# ПАНИКА!



1) Предмет «геология» не преподается в школе. Отдельные мелкие части разрознены по урокам географии и биологии, физики и математики.

2) Кристаллография – сложная и незнакомая подавляющему большинству из вас изящная и красивая наука, требующая хорошего пространственного воображения и математической подготовки. Она тем более не преподается в школьных курсах

3) На первых порах материал усваивается традиционно тяжело и требует систематических занятий и **дополнительных консультаций**



Сентябрь – всегда в вечерние часы.

Или в 426 или на столах рядом

Далее посмотрим.

Если что-то недопонято (**а это нормально**)

то немедленно туда! Поможем!

# Учебники

*Егоров-Тисменко Ю.К.* «Кристаллография и кристаллохимия» М. Изд-во «Книжный Дом Университет», 2005 г., 587 с. **Продается! (в том числе без наценки в 426)**



*Егоров-Тисменко Ю.К., Литвинская Г.П., Загальская Ю.Г.* «Кристаллография», М. Изд-во МГУ, 1992 г. 288 с.



*Еремин Н.Н., Еремина Т.А.* «Занимательная кристаллография», М. МЦНМО, 2013 г. 150 с.  
**Продается! (в том числе без наценки в 426)**

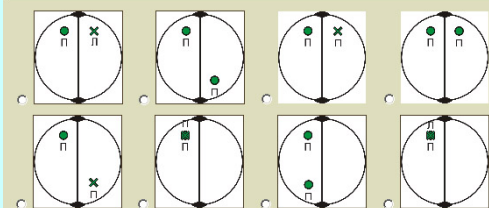
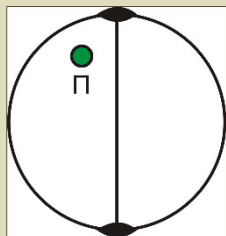




# ИНТЕРАКТИВНАЯ САМОПОДГОТОВКА:

Учитывая тот факт, что успешное изучение данного курса требует еще и хорошего развития пространственного воображения, интерактивные тесты, как показывает практика, позволяют с успехом дополнить очную форму обучения

Указать правильный вариант размножения заданной грани приведенными на проекции элементами симметрии. Укажите, левая (Л) или правая (П) грань получится.



Продолжить Прервать модуль

1. Интерактивы составляют часть оценки контрольных работ.
2. Доступны для прохождения в любое время.
3. Количество попыток не ограничено.
4. Интерактивная составляющая для 1-ой контрольной появится в конце сентября.

# ЕСТЬ ВИДЕОЗАПИСИ ЛЕКЦИЙ (но 6 летней давности)

<https://www.teach-in.ru/course/crystallography>

ГЕОЛОГИЯ 17 ЛЕКЦИЙ

## Кристаллография. Часть 1

548 0

ЛЕКТОР



Еремин Николай Николаевич

#ЛЕКЦИИ  
1 КУРС  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
I СЕМЕСТР  
ВЕСНА 2019

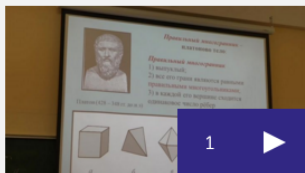
ПОДЕЛИТЬСЯ:

ВИДЕОЛЕКЦИИ

МАТЕРИАЛЫ

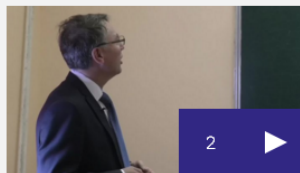
О КУРСЕ

### лекции



Лекция 1. Введение в кристаллографию. История развития кристаллографии, главные открытия и законы

01:19:09

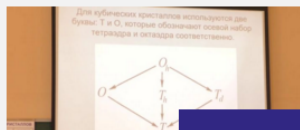


Лекция 2. "Волшебные" оси симметрии. Проецирование. Теорема Эйлера

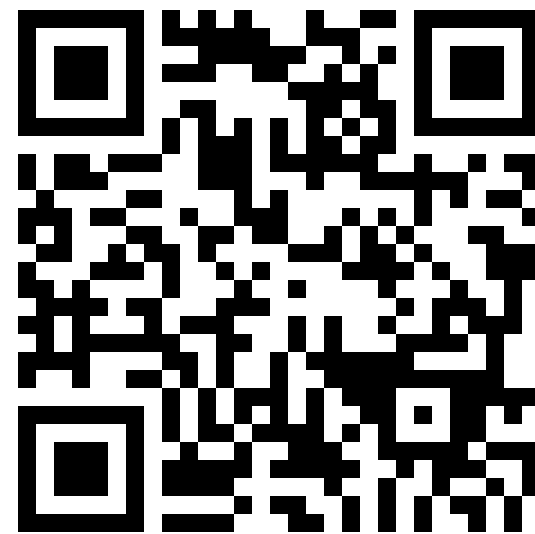
01:30:14



Лекция 3. Основы сферической тригонометрии. Вывод классов симметрии



Лекция 4. Координатные системы. Категории. Сингонии. Символики



# Что изучают геологи?



Геос – Земля, Логос – изучаю.  
Это - предмет которого нет в школе!

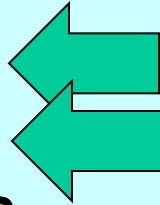
Геология включает в себя более **40 отдельных наук**, связанных с изучением Земли



# Учеба

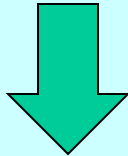
## Новые предметы в расписании

- Общая геология
- Кристаллография
- Высшая математика
- Общая и неорганическая химия
- Русский язык и культура речи



# Новые предметы в расписании

Общая геология



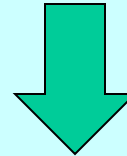
Практика

Структурная геология

Историческая геология

Геология России

Кристаллография



Геохимия

Минералогия

Петрология

Геммология

Геохимические практики

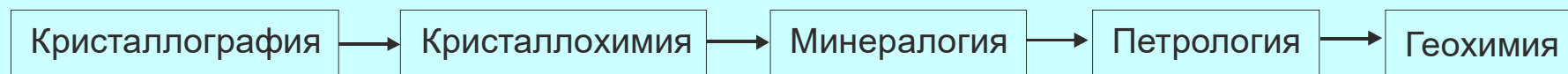
# КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

одна из главных фундаментальных наук о веществе Земли. Это наука не только о кристаллах, но и о процессах их образования, их внешней форме, внутреннем строении и физических свойствах; она затрагивает вопросы о процессах, происходящих в глубинах нашей планеты.

Поэтому именно кристаллография связывает многие разделы геологии со смежными фундаментальными науками, известные школьникам: физикой, химией, геометрией.

Положение современной кристаллографии во многом напоминает роль математики, методы которой используются в многочисленных и разнообразных дисциплинах. Практически все научные и технические достижения последнего времени непосредственно связаны с кристаллографией. Сюда можно отнести компьютерную микроэлектронику, электронную микроскопию, открытие квазикристаллов, явление высокотемпературной сверхпроводимости и т.д.

**БЕЗ усвоения базовых знаний КРИСТАЛЛОГРАФИИ –  
бессмысленно двигаться дальше по геохимической цепочке,  
цикле наук, изучающих ВЕЩЕСТВО.**



Кристаллография обладает своим только ей присущим  
методом – **методом симметрии**.

«Симметрия» - по-гречески – соразмерность.

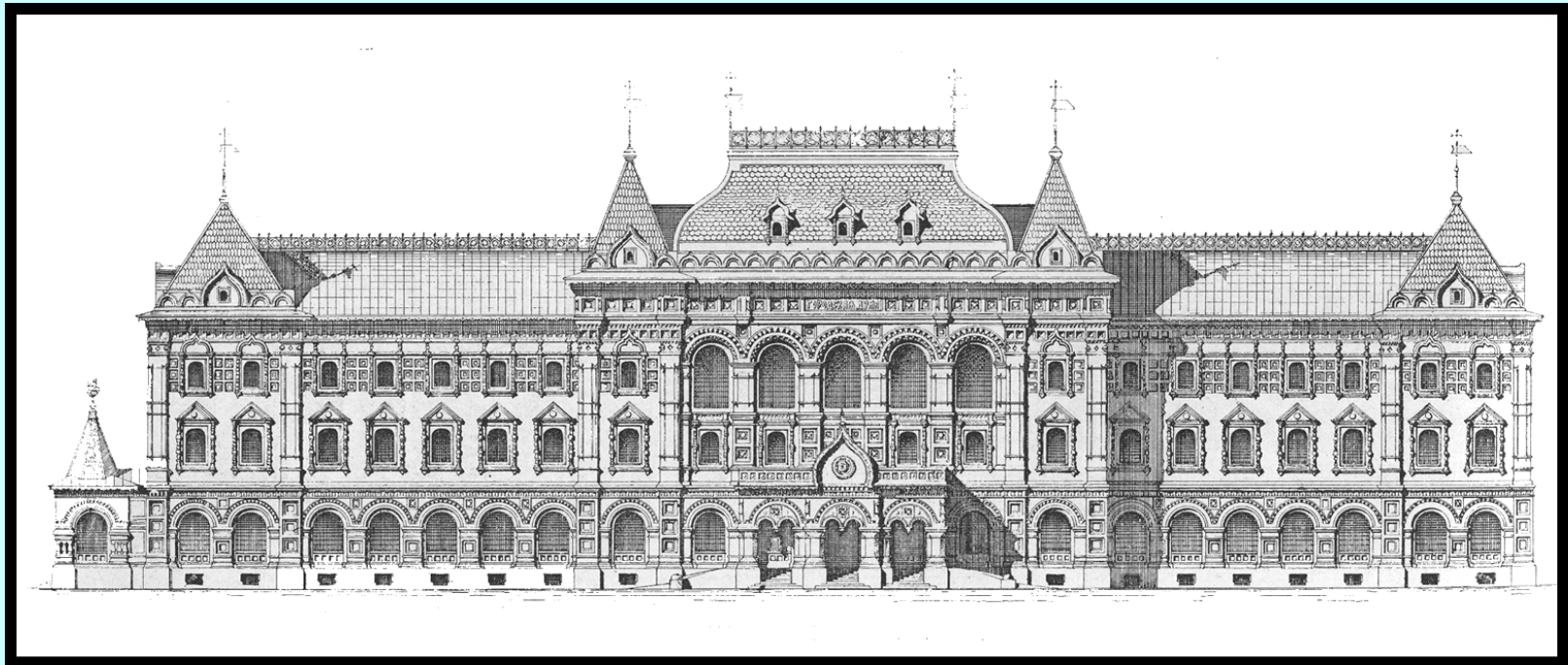
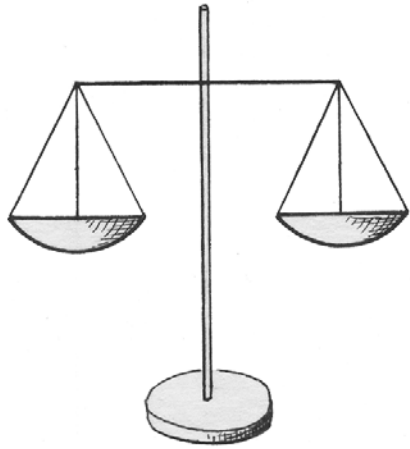
**«Симметрия есть идея, с помощью которой человек  
веками пытался объяснить и создать порядок,  
красоту и совершенство» (Герман Вейль)**

# ***СИММЕТРИЯ ВОКРУГ НАС***

# Два бытовых значения слова «симметрия»:

1. нечто, обладающее хорошим соотношением пропорций (музыка, архитектура, поэзия, геометрия),
2. зеркальная симметрия (весы)

Фасад здания Городской Думы в Москве  
обладает зеркальной (билатеральной) симметрией



# ***НЕКОТОРЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ***

*write*





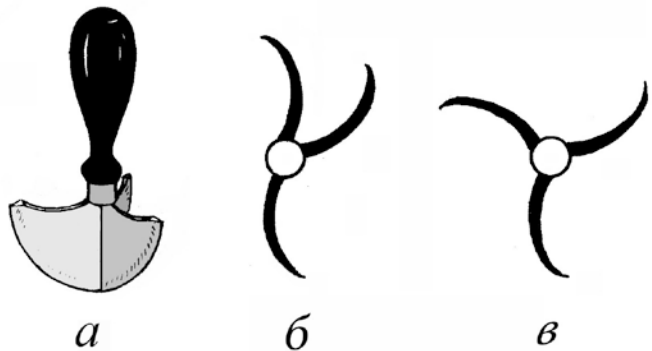
«Симметрия – это  
свойство геометрических  
тел повторять свои  
части»

*Е.С.Федоров*

**Симметричная фигура** - Объект, который может быть совмещен сам с собой определёнными преобразованиями, например, поворотами или отражениями.

**Операция симметрии** - Преобразование, совмещающее симметричную фигуру с собой. (Поворот, отражение **и т. д.**)

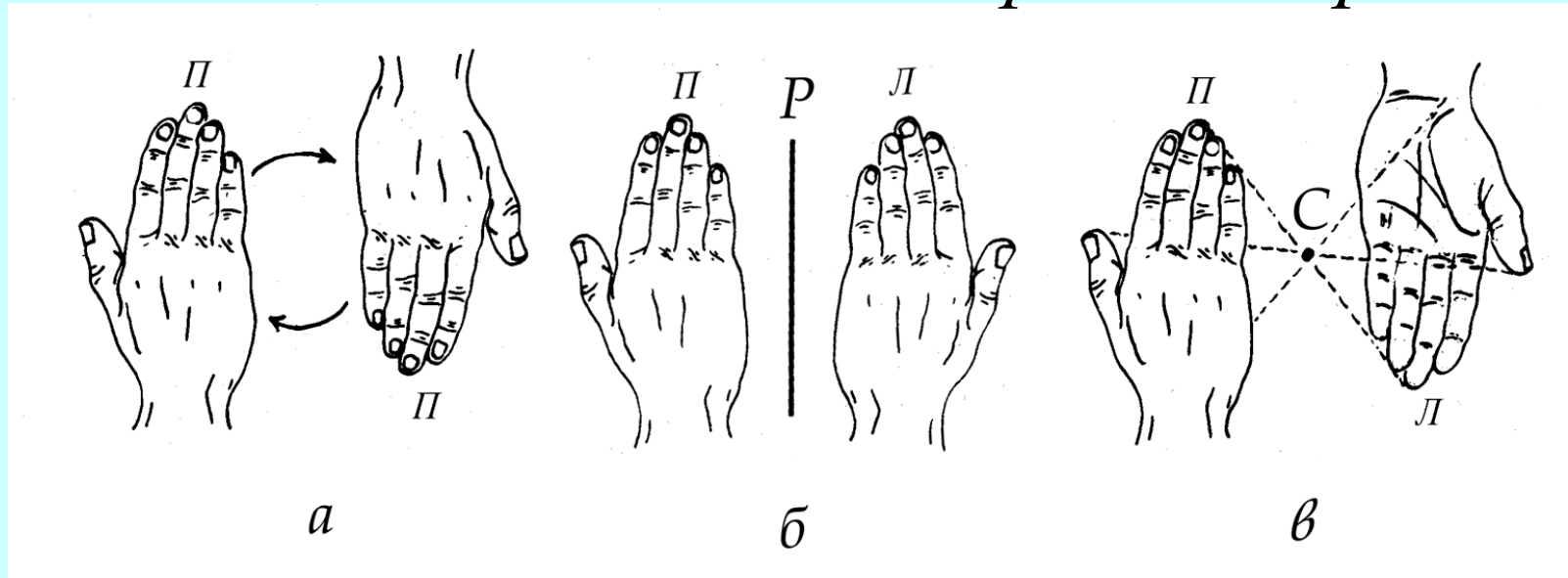
**Элемент симметрии** - Вспомогательные геометрические образы (точки, прямые, плоскости), с помощью которых обнаруживается симметрия фигур



*a* – резак, обладающий поворотной осью 3-го порядка,  
*б* – «несимметричная» фигура с произвольным расположением лопастей,  
*в* – симметричная фигура (лопасти повернуты одна относительно другой на  $120^\circ$ )



В зависимости от характера преобразования различают *элементы симметрии I и II родов*.



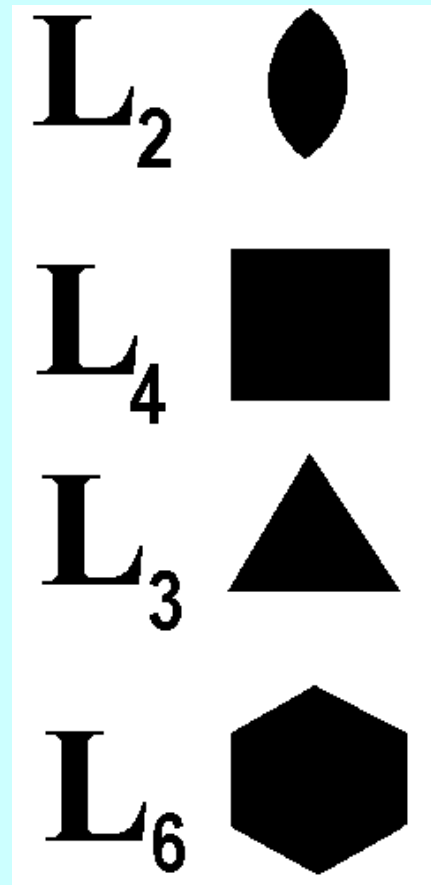
**Элементы симметрии I рода** связывают друг с другом **конгруэнтно равные** фигуры (греч. *congruens* - совмещающийся), т.е. фигуры, совмещающиеся при наложении (вложении) – правые (П) с правыми, левые (Л) с левыми.

**Элементы симметрии II рода** связывают друг с другом **энантиоморфные** (греч. *enantios* – противоположный, *morphe* – форма), т.е. зеркально равные фигуры или их части – П с Л.

Операция симметрии (1-ого рода) - **Поворот**

Элемент симметрии - **Поворотная ось  $L_n = 360^\circ/\alpha$ ,**  
**где  $n$  – порядок оси,  $\alpha$  - элементарный угол поворота**

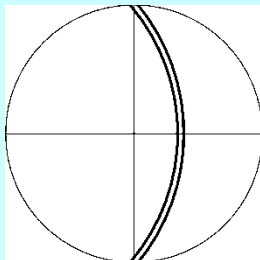
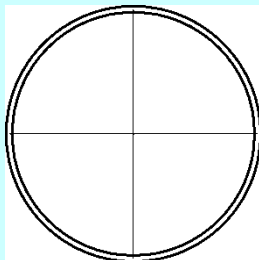
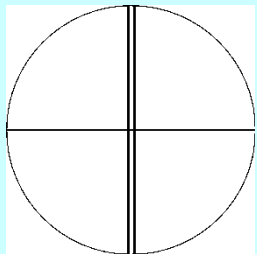
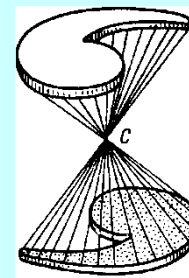
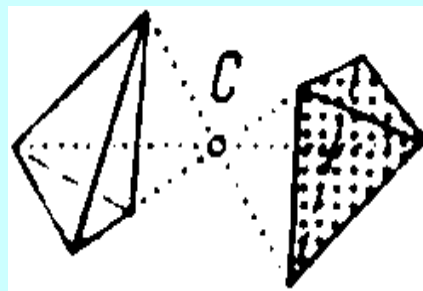
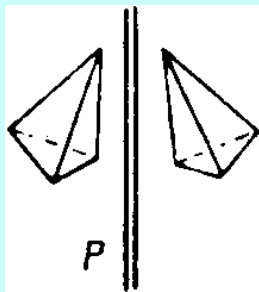
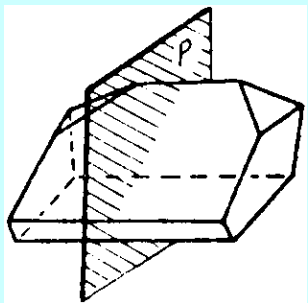
Обозначение



# Операция симметрии (2-ого рода) - **Отражение**

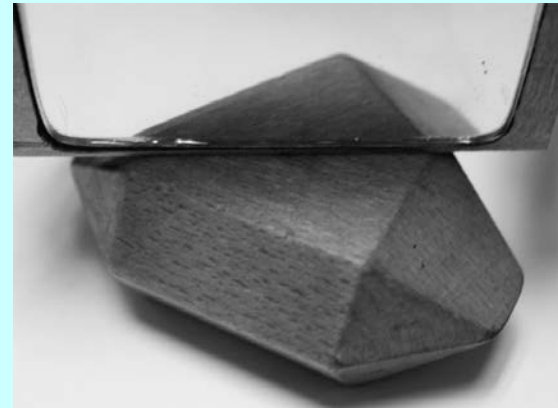
Элемент симметрии –  
**Зеркальная плоскость**  
 **$P$**

Обозначение



## Элемент симметрии – **Зеркальная плоскость**

Объект, обладающий зеркальной плоскостью, разбивается этим элементом симметрии на две зеркально равные – энантиоморфные – части. Для определения наличия зеркальной плоскости в объекте полезно иметь наготове прямоугольное зеркальце. При прикладывании его к объекту отражение должно в точности соответствовать закрываемой части фигуры



*Слева* – зеркало приложено правильно и символизирует наличие в этом месте плоскости  $P$ ; *справа* – зеркало приложено неверно, плоскость по этой линии отсутствует

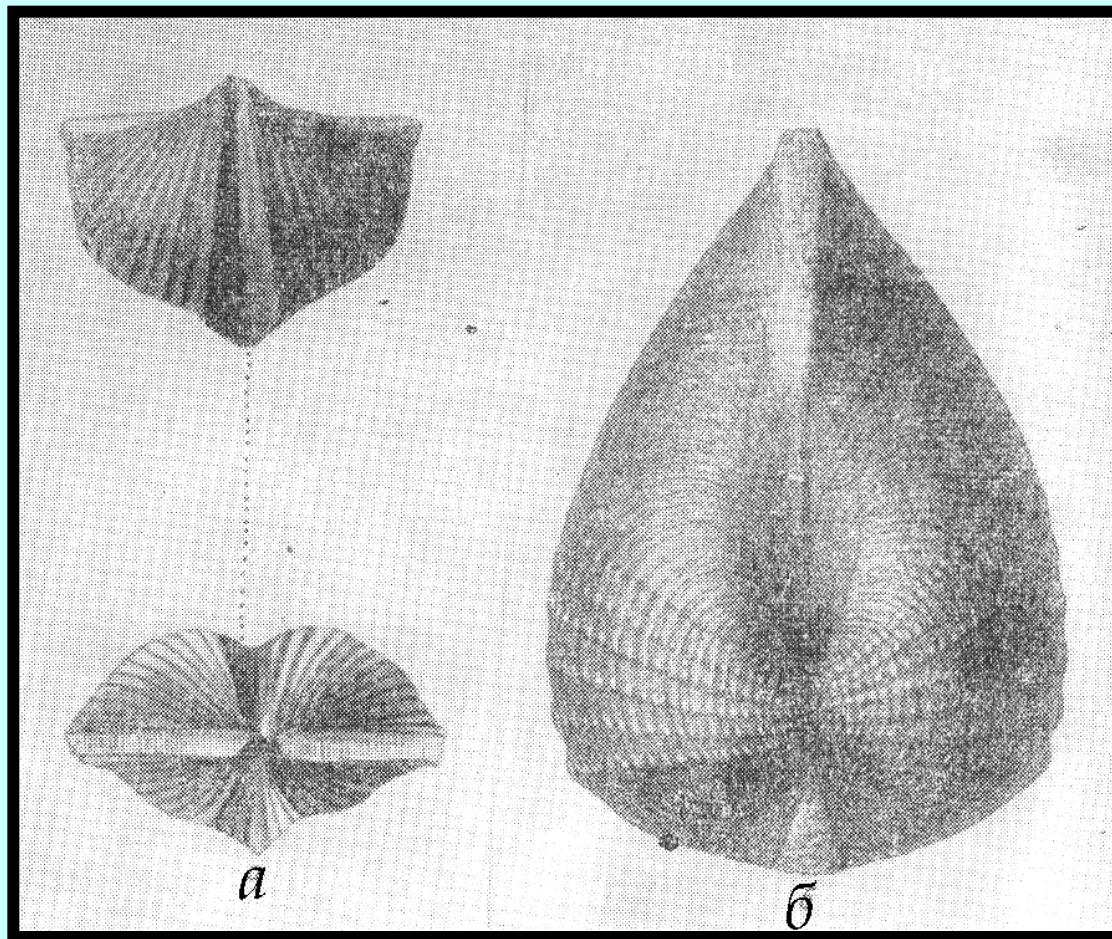
**Есть еще элементы..  
Но о них не сегодня**



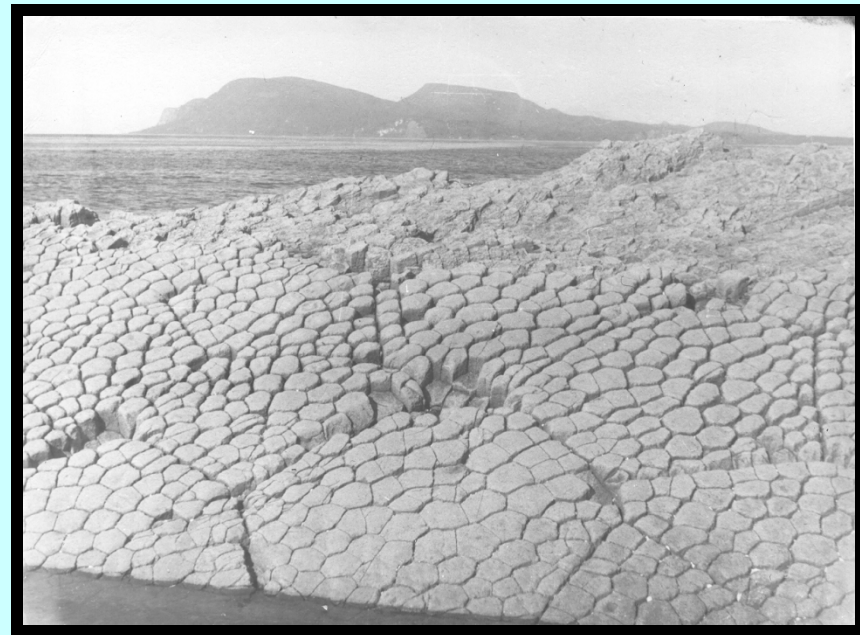
## Геологические объекты симметричны

Двустворчатые раковины с плоскостью симметрии:

- а) перпендикулярной створкам (класс брахиопод),
- б) проходящей между створками (класс пелеципод)



## Геологические объекты симметричны



Столбчатая отдельность в базальтах. Остров Кунашир.  
Мыс Столбчатый

# Пример зеркальной симметрии

поверхность воды

(озеро Горное, Ловозерские тундры, Кольский полуостров).



**В горах есть горизонтальные плоскости!**

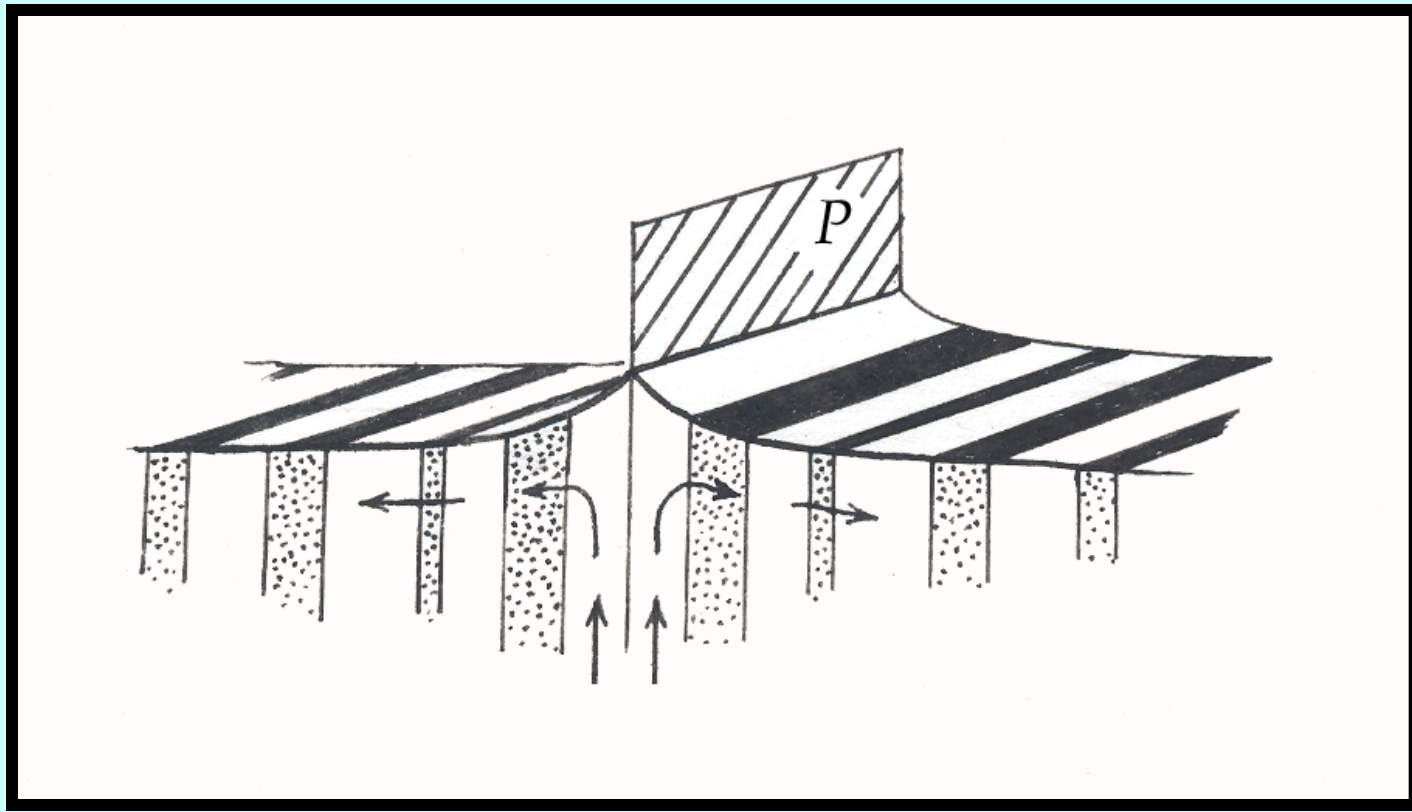
В плохую погоду увидеть трудно, к сожалению...

Поверхность воды  
(озеро Райявр, Ловозерские тундры, Кольский полуостров).



## Геологические объекты симметричны

Схема срединно-океанического хребта, через который проходит зеркальная плоскость симметрии ( $P$ )

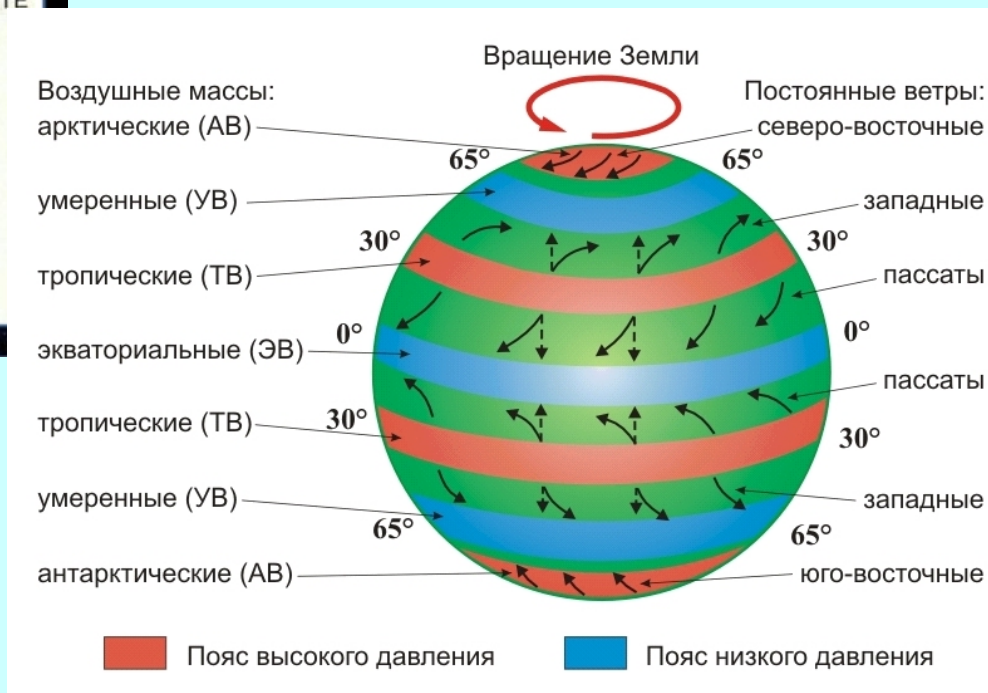


# Геологические объекты симметричны

## Тепловые пояса Земли.



## Воздушные массы Земли.



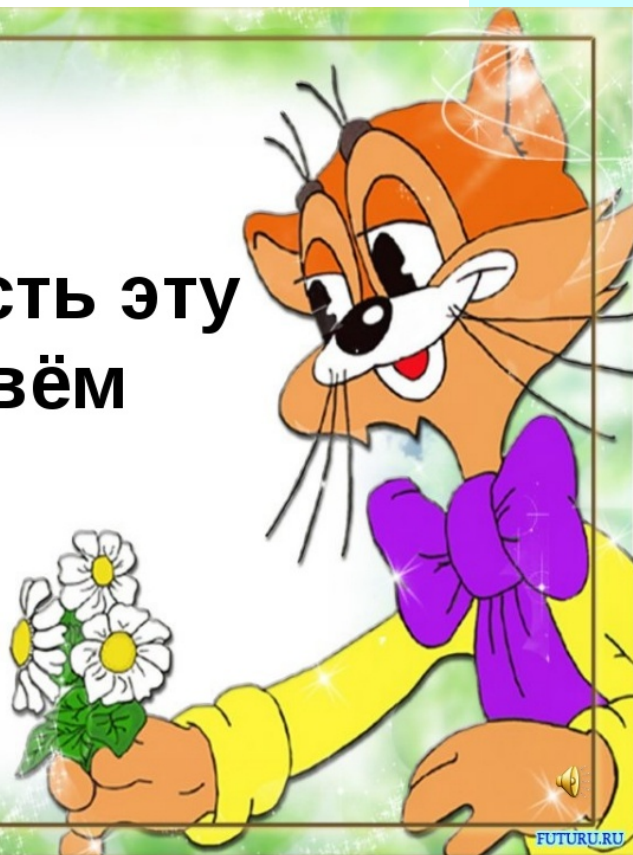
# Геологические объекты симметричны



Вулкан – можно провести бесконечное число зеркальных  
плоскостей

Итого. Сколько всего есть элементов симметрии?

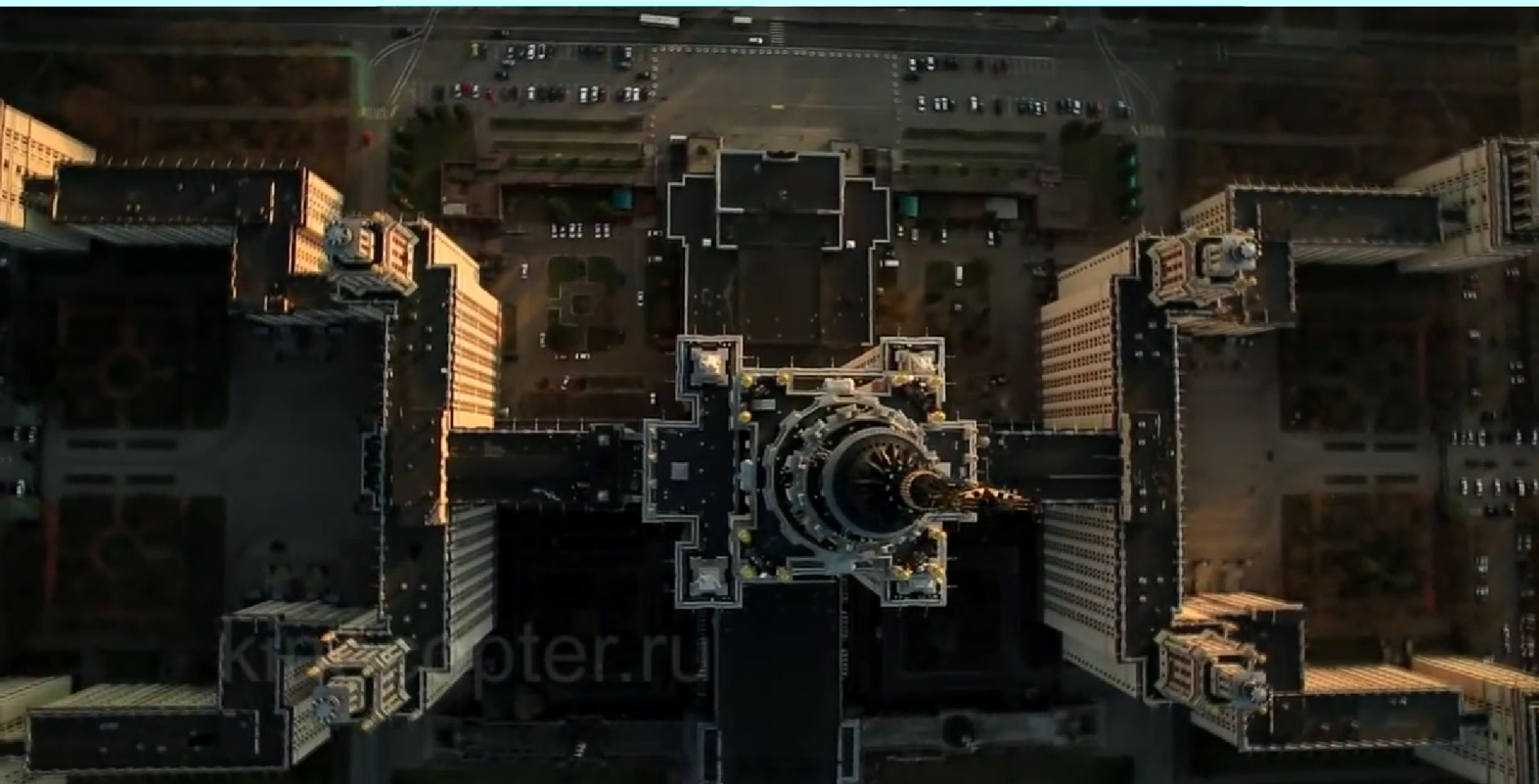
**Неприятность эту  
мы переживём**



Как то много  
получается..

Но...

# Поиграем

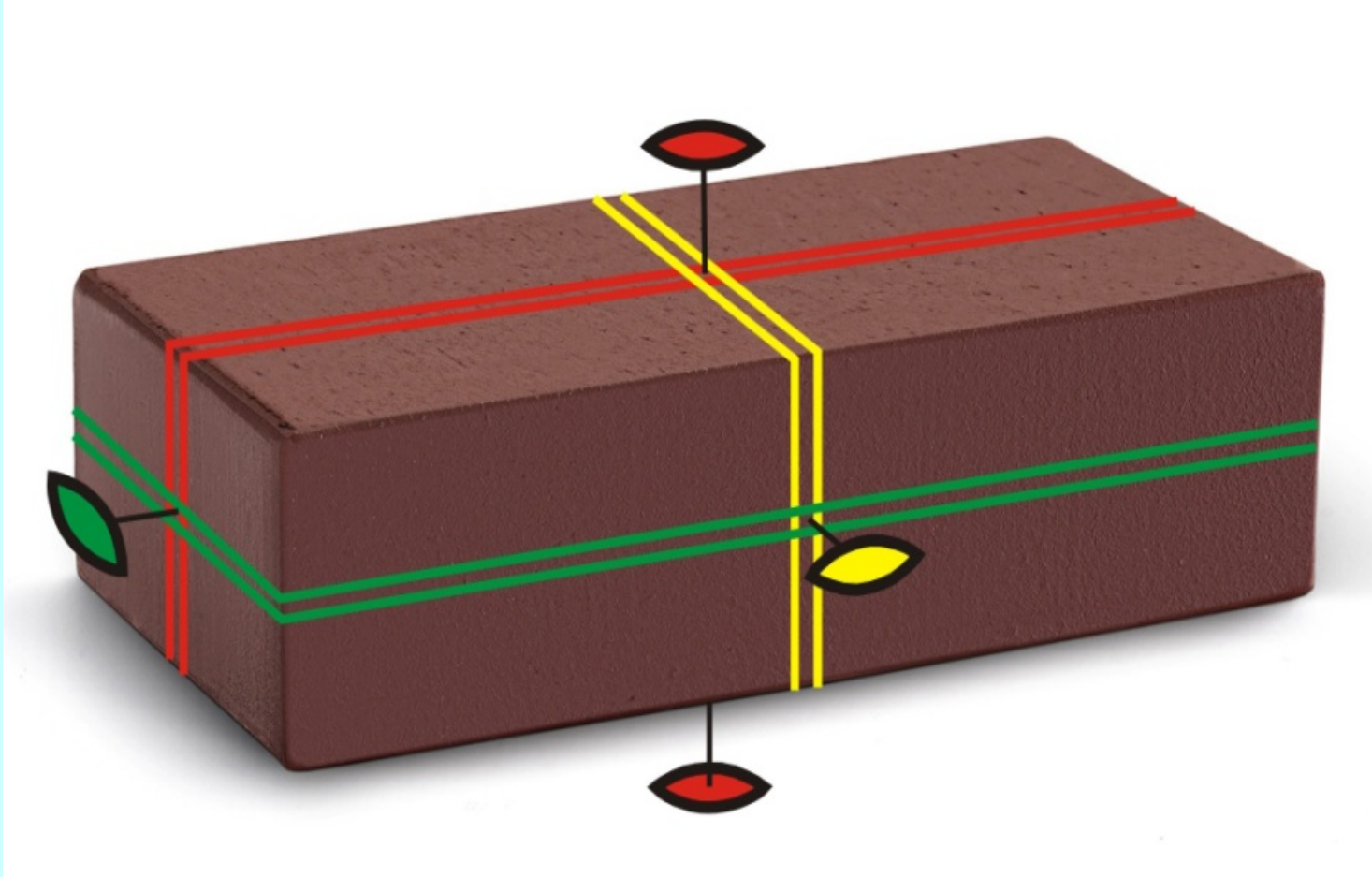


# Поиграем



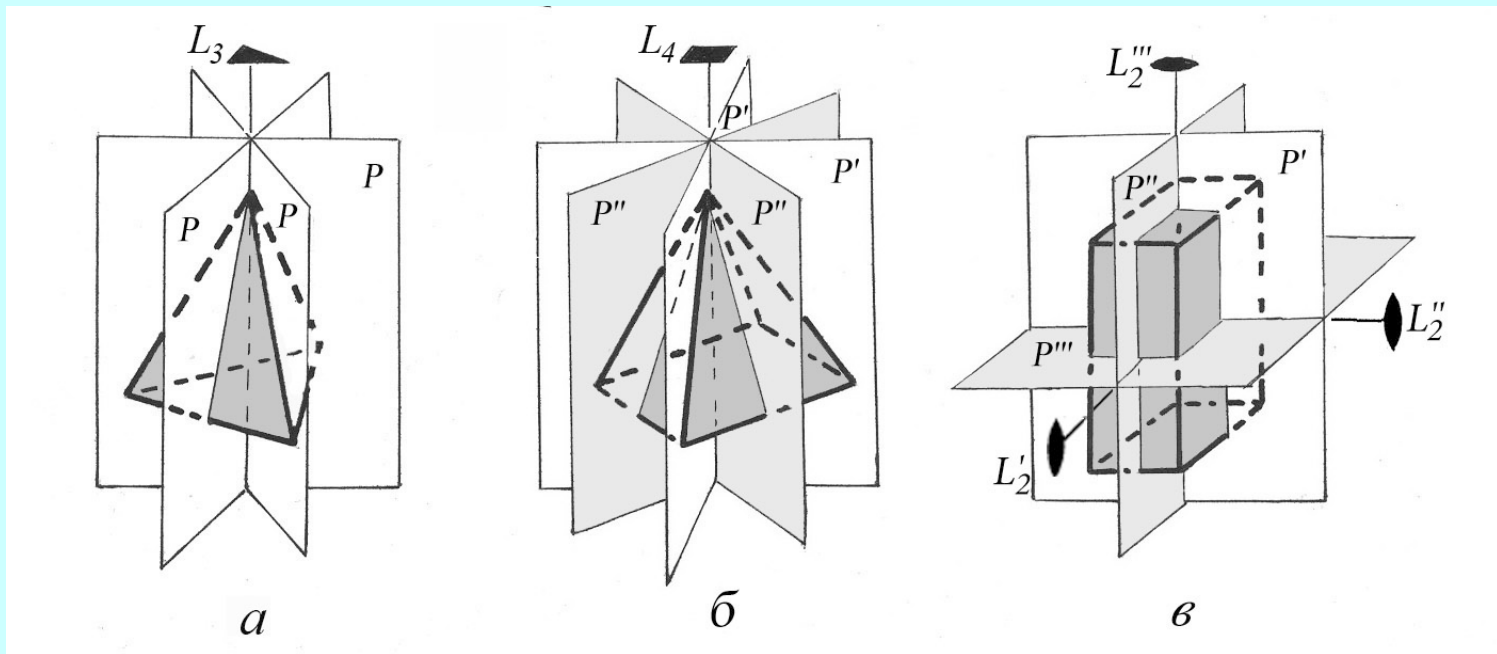
# Поиграем





# Эквивалентные и неэквивалентные элементы симметрии

*Эквивалентные элементы симметрии, связаны какими-либо операциями симметрии данного кристалла.*



Эквивалентные и неэквивалентные элементы симметрии:  
 $a - L_3 3P$ ,  $б - L_4 4P = L_4 2P' 2P''$ ;  $в - 3L_2 3P = L_2' L_2'' L_2''' P' P'' P''' C$

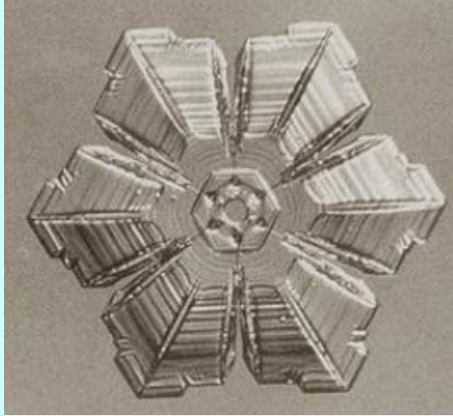
# Поиграем



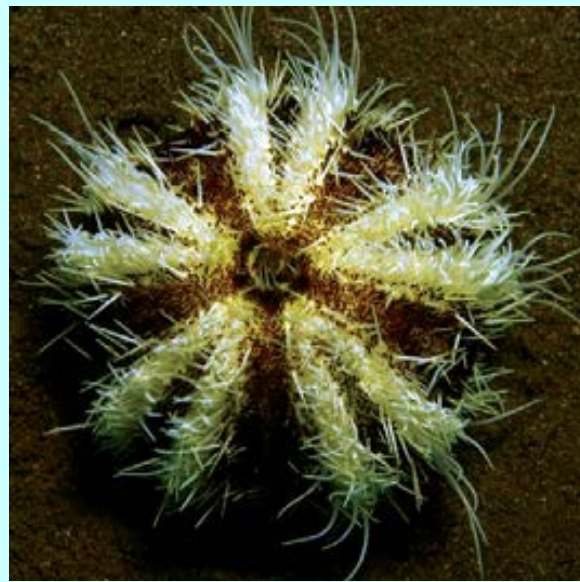
# Поиграем



# Поиграем



# Поиграем



# *НЕКОТОРЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ ВЕХИ РАЗВИТИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИИ*



## Сейчас можно выделить четыре основных периода в истории развития кристаллографии

- **1-й период - эмпирический** (или собирательный) почти до начала XIX века - период постепенного накопления фактического материала, выявления и осмысления особенностей кристаллов;
- **2-й период - теоретический** (или объяснительный) - XIX век, - период интенсивного теоретического исследования форм и теоретических законов внутреннего строения кристаллов (до 1912 года).
- **3-й период - экспериментальный** с отчетливым прикладным направлением (с 1912 года).
- **4-й период – предсказательный** (~ с 2010 года).

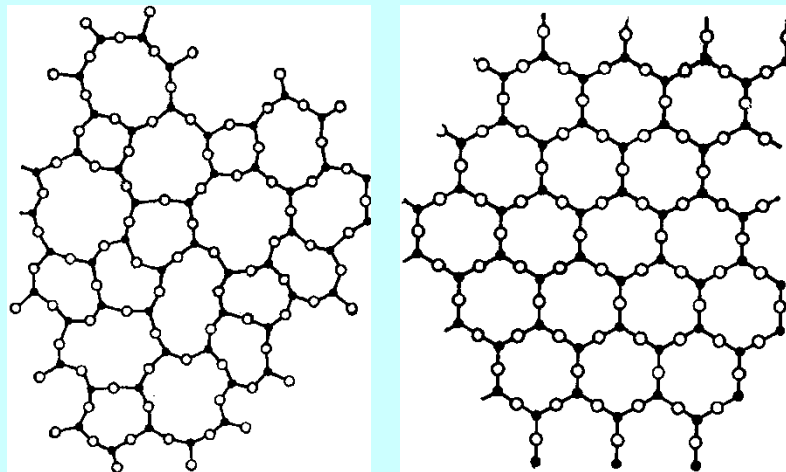
Слово “*кристалл*” произошло от греческого (кристаллос), во времена древнегреческого поэта Гомера означавшего “прозрачный лед”.

*Демокрит* (470 г. до н. э.),  
*Эпикур* (341-270 гг. до н. э.),  
*Аристотель* (384-322 гг. до н. э.),  
*Плиний Старший* (24 - 79 гг. н. э.),  
*Бируни* (973-1050 гг.),  
*Авиценна (Ибн Сина, 980-1037 гг.),*  
*Кардано Джероламо* (1501-1576 гг.),  
*Иоганн Кеплер* (1571-1630 гг.).

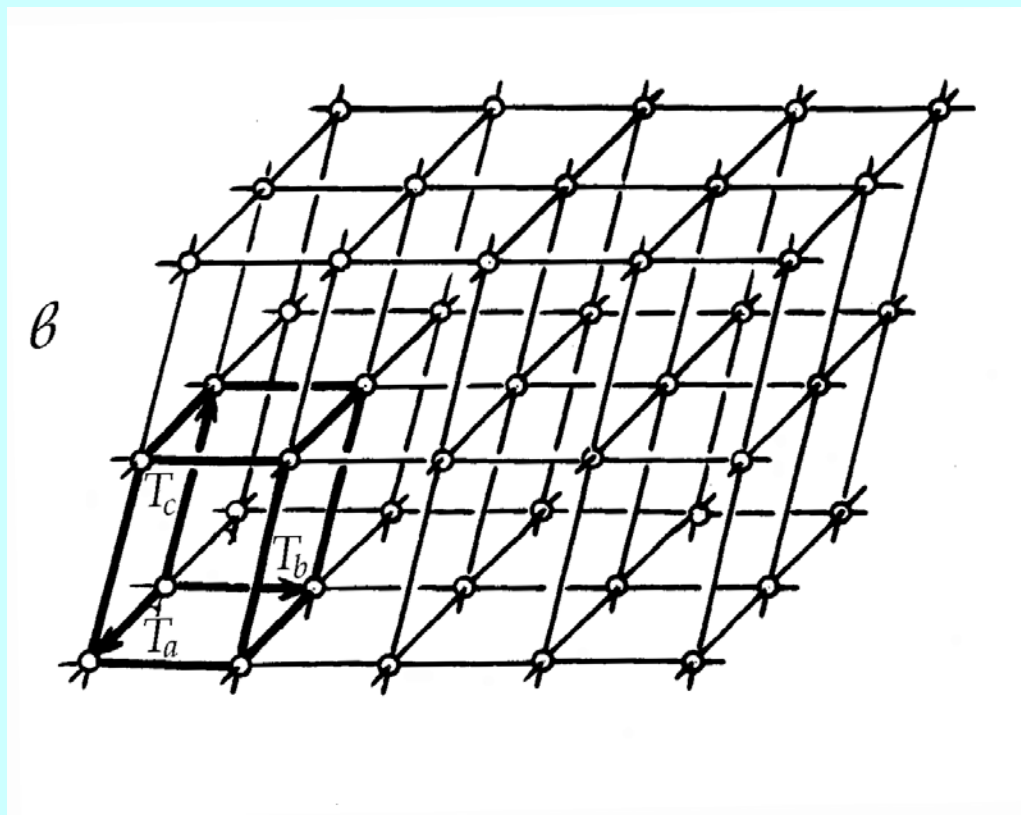
внесли свой вклад в изучение этих чудесных  
творений неживой природы

**Кристаллы** обладают решетчатым строением - расположение объектов (атомов) в пространстве, подчиняющееся постоянным параллельным переносам (трансляциям  $T$ ) вдоль трех координатных направлений.

**В отличие от аморфного (и недавно открытого квазикристаллического) состояния** - кристаллическое состояние характеризуется как ближним, так и дальним порядком в расположении частиц.

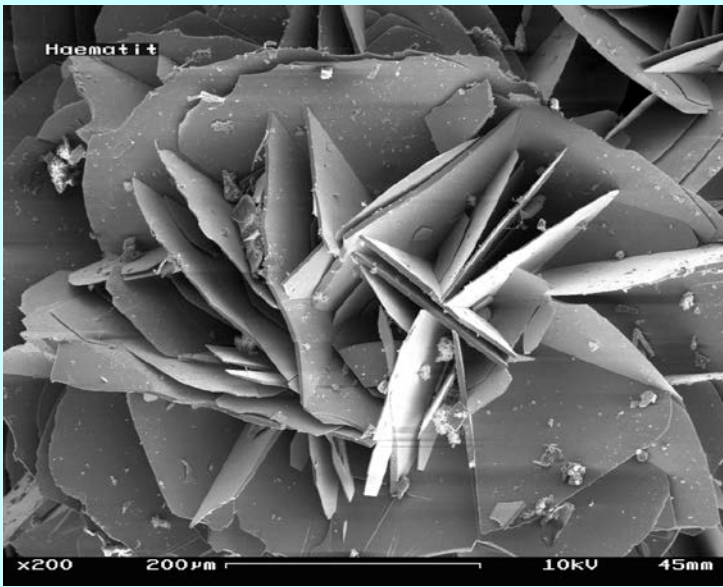


**Кристаллическая решетка (пространственная решетка)** — схема, отражающая закономерность (периодичность) расположения материальных частиц (атомов, ионов, молекул) в кристаллической структуре вещества.



## Кристаллы – объекты очень разных размеров

Кристаллы **гематита** под электронным микроскопом.  
Размер кристаллов  
200 микрон.



Пещера, обнаруженная в 2000 г  
в Мексике.  
Размер кристаллов селенита  
(разновидность **гипса**)  
до 15 м.



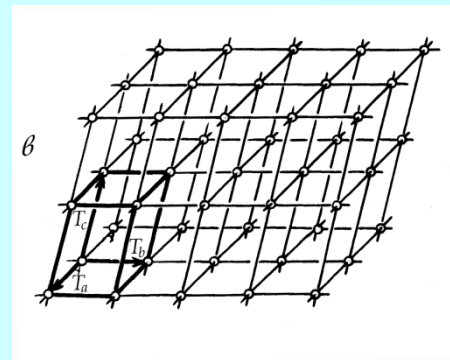


Давайте дадим определение,

что такое кристалл?

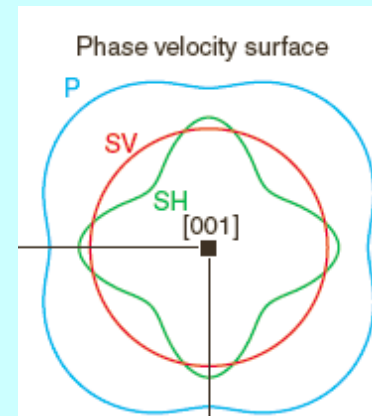
**КРИСТАЛЛЫ** - твердые, **однородные**, анизотропные вещества, способные в определенных условиях самоограняться.

**Однородность** - Под однородным понимают такое тело, каждой точке которого соответствует бесчисленное множество расположенных на конечных расстояниях друг от друга эквивалентных точек не только в физическом, но и в геометрическом смысле. *Кристаллическая решетка — выразитель кристаллического состояния вещества, так как любой кристалл, даже лишенный какой-либо внешней симметрии, обладает трехмерной периодичностью, т. е. находится в состоянии решетки.*



**КРИСТАЛЛЫ** - твердые, однородные, **анизотропные** вещества, способные в определенных условиях самоограняться.

**Анизотропность** - это способность кристалла по-разному проявлять одно и то же свойство в различных направлениях. Поскольку многие физические свойства кристаллов, такие как твердость, теплопроводность, показатели преломления, спайность и др., зависят от межатомных расстояний, а следовательно, от типа и силы химических связей между атомами, то в разных направлениях в кристаллическом веществе они проявляются по-разному.



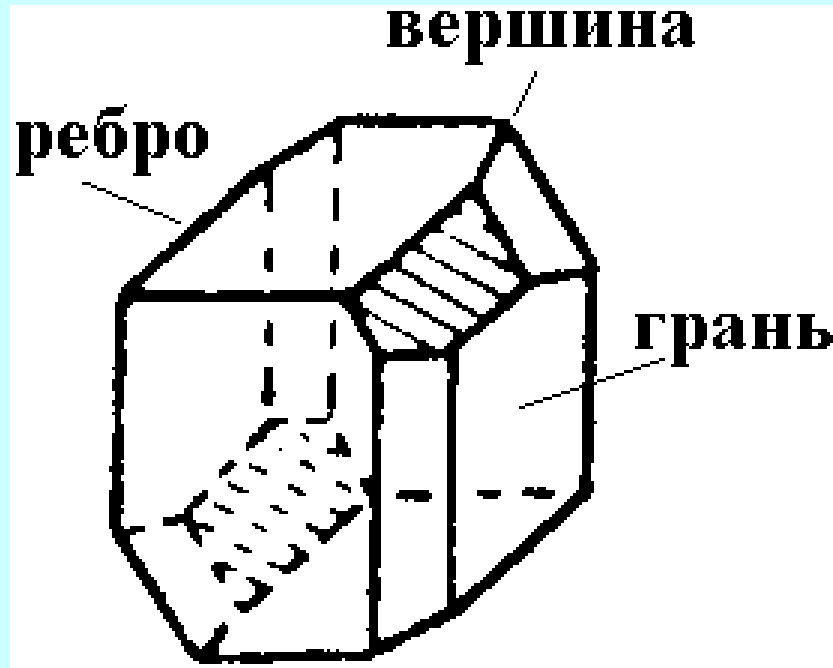
**КРИСТАЛЛЫ** - твердые, однородные, анизотропные вещества, способные в определенных условиях **самоограняться**.

Еще одним важным свойством кристаллического вещества, отличающим его от аморфного, является способность кристалла при определенных условиях принимать естественную многогранную форму, т. е. **самоограняться**.

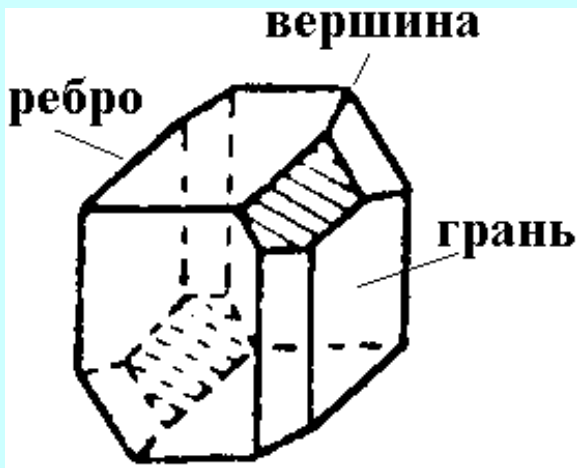
Любой обломок кристалла, попав в соответствующую среду, например, в пересыщенный раствор того же состава, начнет покрываться гранями, в то время как аморфное вещество останется без изменения.



**КРИСТАЛЛ** (как геометрическая фигура) – часто проявляется как выпуклый многогранник элементами которого являются:



- \* **Грань** - плоская поверхность, ограничивающая кристалл
- \* **Ребро** - Линия пересечения двух граней кристалла
- \* **Вершина** - точка пересечения ребер кристалла

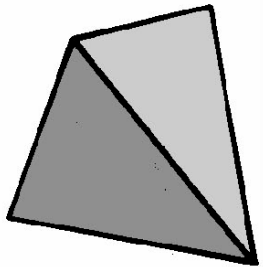


\* **Грань** - плоская поверхность, ограничивающая кристалл

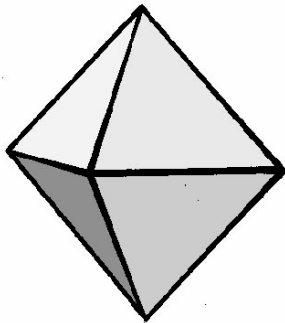
\* **Ребро** - Линия пересечения двух граней кристалла

\* **Вершина** - точка пересечения ребер кристалла

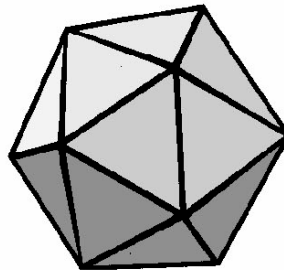
В выпуклом многограннике  
сумма чисел его вершин и граней на 2 больше числа его рёбер,  
т.е.  $V + \Gamma = P + 2$



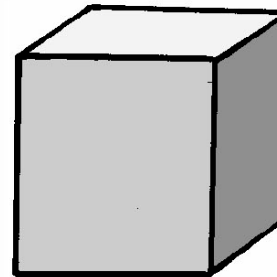
*a*



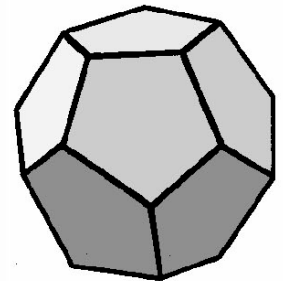
*б*



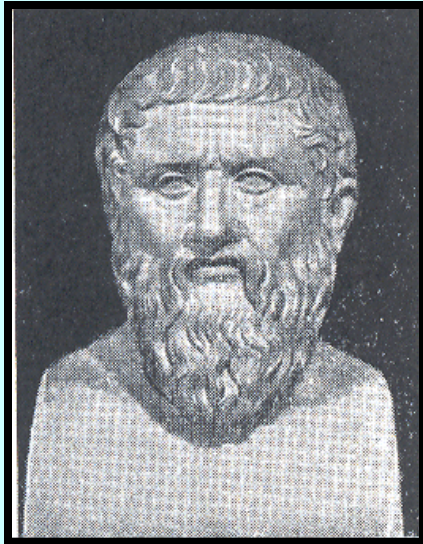
*в*



*г*



*д*

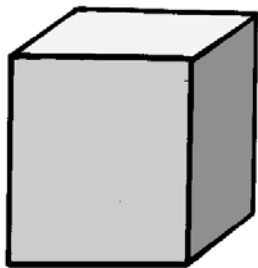


## *Правильный многогранник* – ПЛАТОНОВО ТЕЛО:

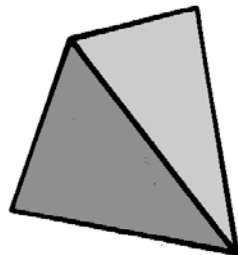
### *Правильный многогранник*

- 1) выпуклый;
- 2) все его грани являются равными *правильными многоугольниками*;
- 3) в каждой его вершине сходится одинаковое число рёбер

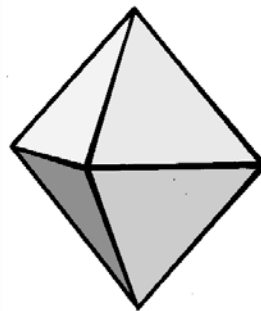
Платон (428 – 348 гг. до.н.э)



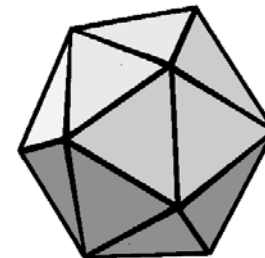
*а*



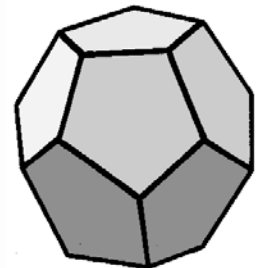
*б*



*в*



*г*



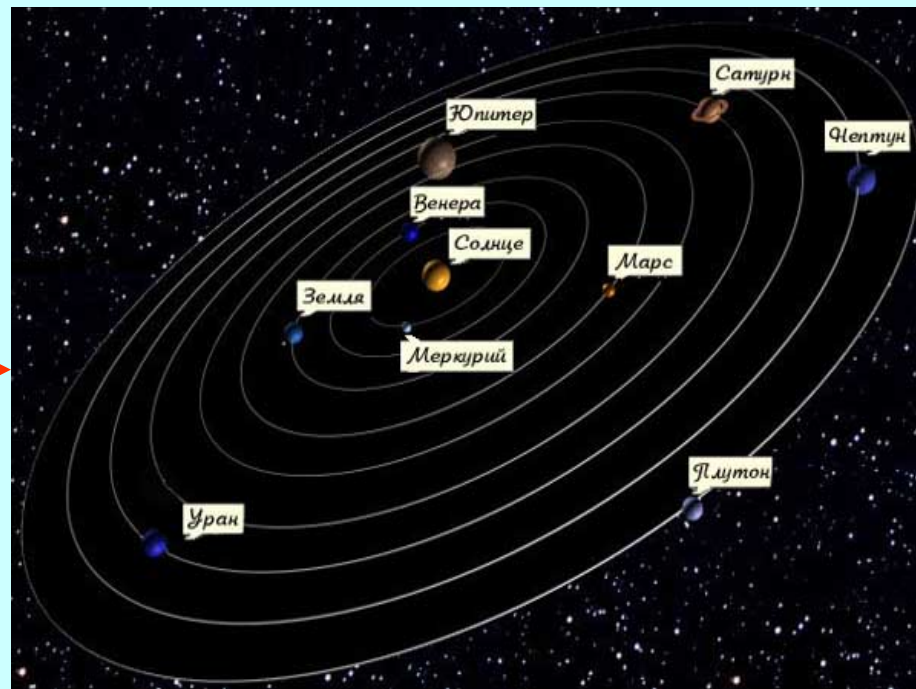
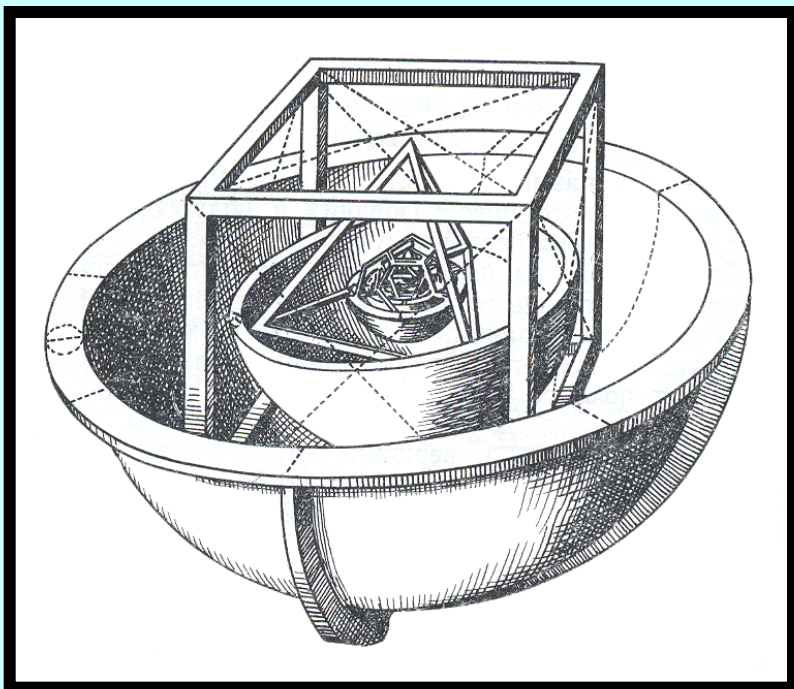
*д*

- Земля      огонь      воздух      вода      Вселенная

# Характеристики правильных выпуклых многогранников (их всего 5, мы это скоро легко докажем)

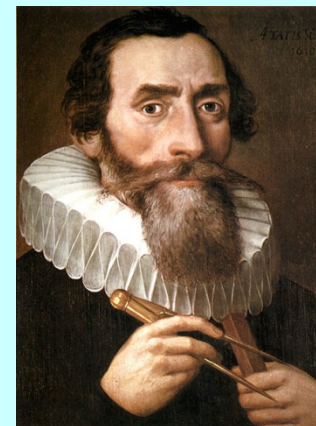
| Многогранник | Число вершин | Число граней | Сумма В+Г | Число ребер | Число ребер+2 | Встречаемость в кристаллах |
|--------------|--------------|--------------|-----------|-------------|---------------|----------------------------|
| тетраэдр     | 4            | 4            | 8         | 6           | 8             | Да                         |
| гексаэдр     | 8            | 6            | 14        | 12          | 14            | Да                         |
| октаэдр      | 6            | 8            | 14        | 12          | 14            | Да                         |
| икосаэдр     | 12           | 20           | 32        | 30          | 32            | НЕТ                        |
| додекаэдр    | 20           | 12           | 32        | 30          | 32            | НЕТ                        |

# Магия Платоновых тел

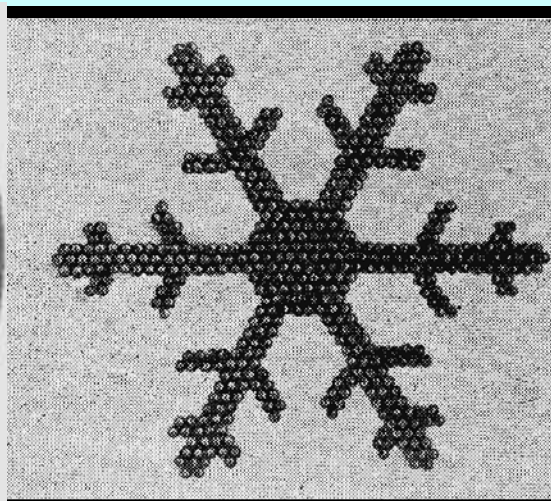


В «Тайне мира», опубликованной в 1596 году, немецкий математик и астроном Кеплер изложил свою модель Солнечной системы.

Построение **И. Кеплера**: шесть сфер, соответствующих орбитам 6 планет – Сатурну, Юпитеру, Марсу, Земле, Венере и Меркурию, разделенные **кубом, тетраэдром, додекаэдром, октаэдром и икосаэдром**. В наличие скрытой математической гармонии Вселенной Кеплер верил до конца жизни



В 1611 г. *Иоганн Кеплер* (1571-1630 гг.) в трактате “О шестиугольных снежинках”, подробно описал формы снежинок и высказал предположение о связи правильной шестиугольной формы снежинок с плоскостной укладкой шарообразных частиц вещества. Этим он заложил основы геометрии плотнейших шаровых упаковок.



«Человека Кеплера читала»

Неудачная во всех отношениях пародия на меня и экзамен по кристаллографии в МГУ («Мой парень ангел»). И экзамен не может быть 31 декабря....



*«Кристаллография сложная наука»*

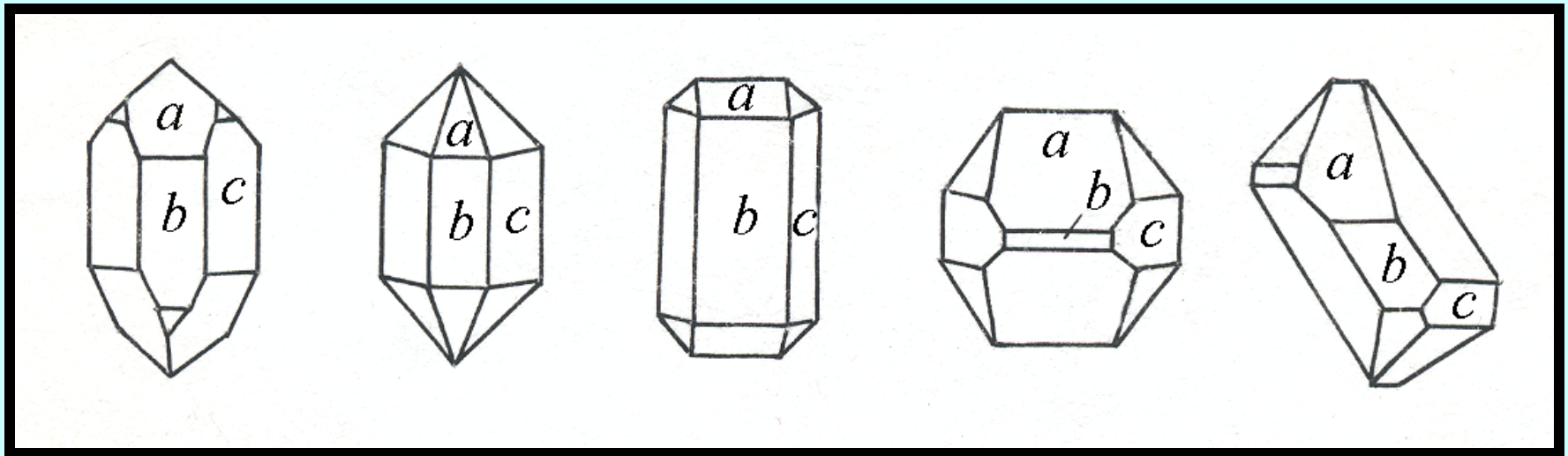


И съемочную группу в МГУ не пустили, снимали в Бауманке..

И вообще, я на Волынцева совсем не похож....

И экзамен у нас красивее намного и антуражнее

# Волшебство кристаллического мира № 1

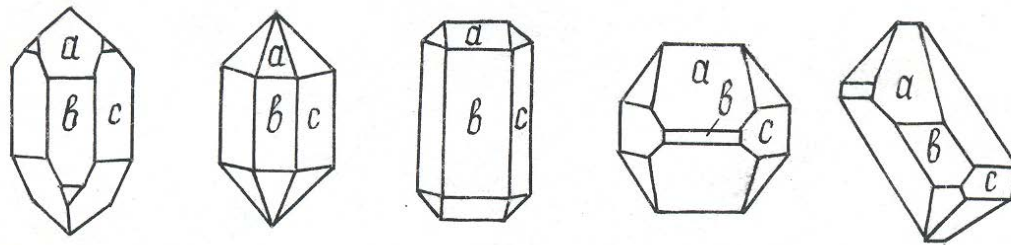


Кристаллы кварца, иллюстрирующие закон постоянства углов

Датский естествоиспытатель **Николай Стенон** (Нильс Стенсен, 1638-1686 гг.), исследуя кристаллы кварца открыл **основной закон геометрической кристаллографии –**

**- закон постоянства углов:**

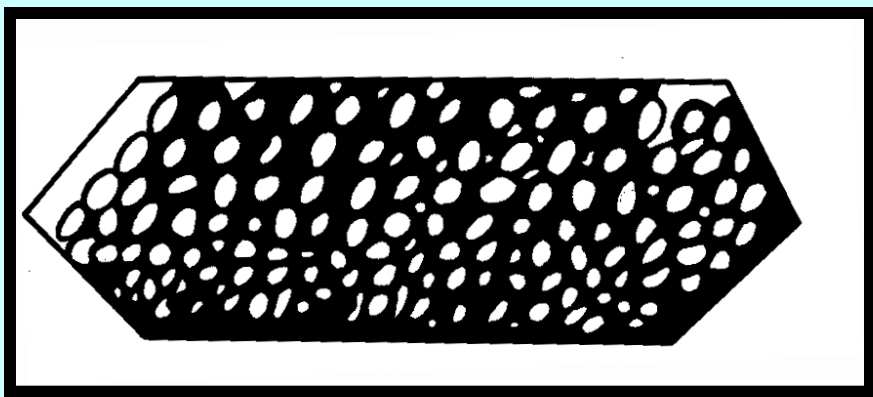
**Хотя кристаллы одного и того же вещества (минерала) могут иметь разную форму, углы между их соответственными гранями остаются неизменными**



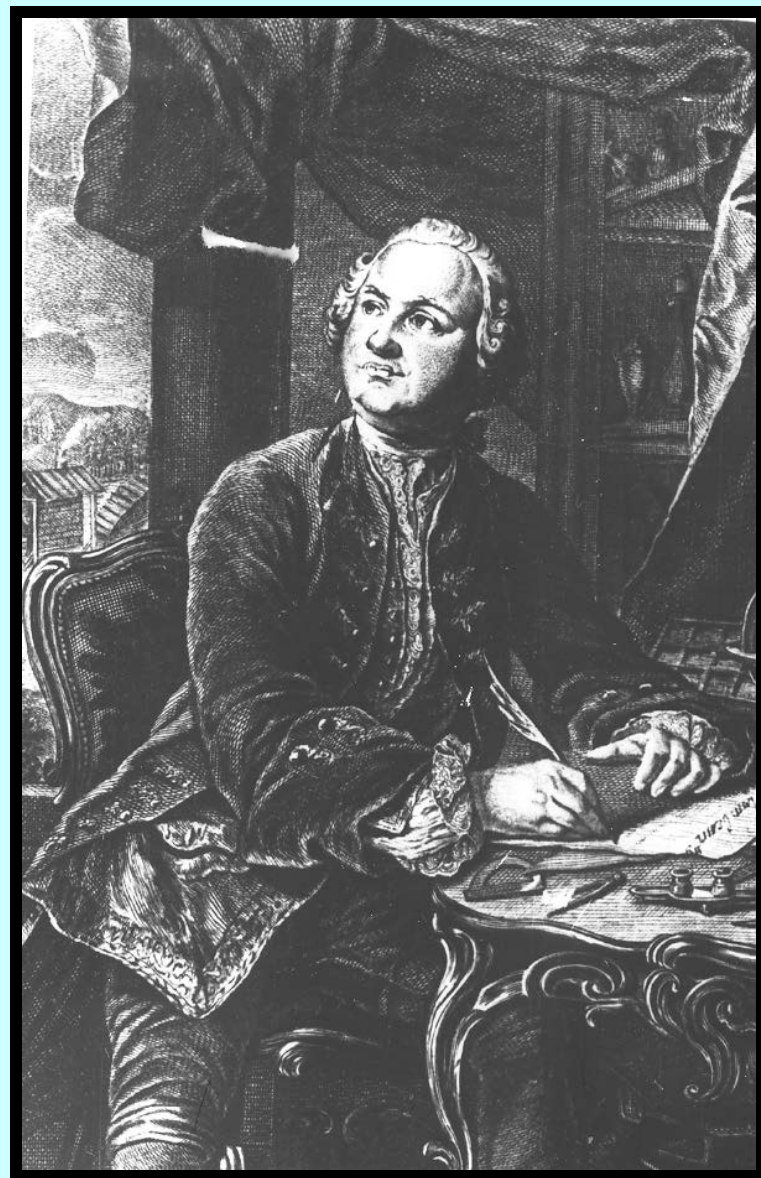
Схема, иллюстрирующая  
закон постоянства углов

❖ Однако, хотя краткие тезисы Стенона «О твердом, естественно содержащемся в твердом» публиковались при его жизни трижды, они лежали в архивах более ста лет, не оказав практически никакого влияния на развитие науки.

Закон постоянства углов  
*подтвердил* М. В. Ломоносов (1711-  
1765 гг.), который в 1749 г. в своей  
диссертационной работе  
“О рождении и природе селитры”  
объяснил этот закон плотнейшей  
укладкой шарообразных частиц –  
корпускул ).



Расположение шарообразных частиц  
(корпускул) в кристалле селитры

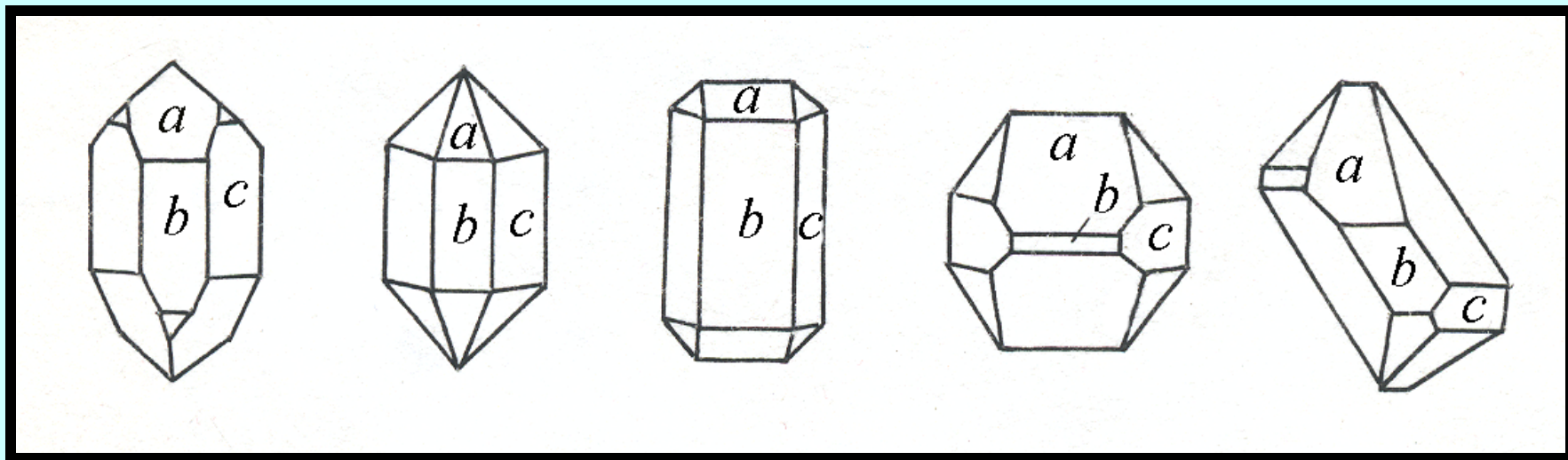




В 1783 г. **Ж. Б. Л. Роме-де-Лиль**  
(1736-1790 гг.) **вновь сформулировал закон**  
**постоянства углов:**

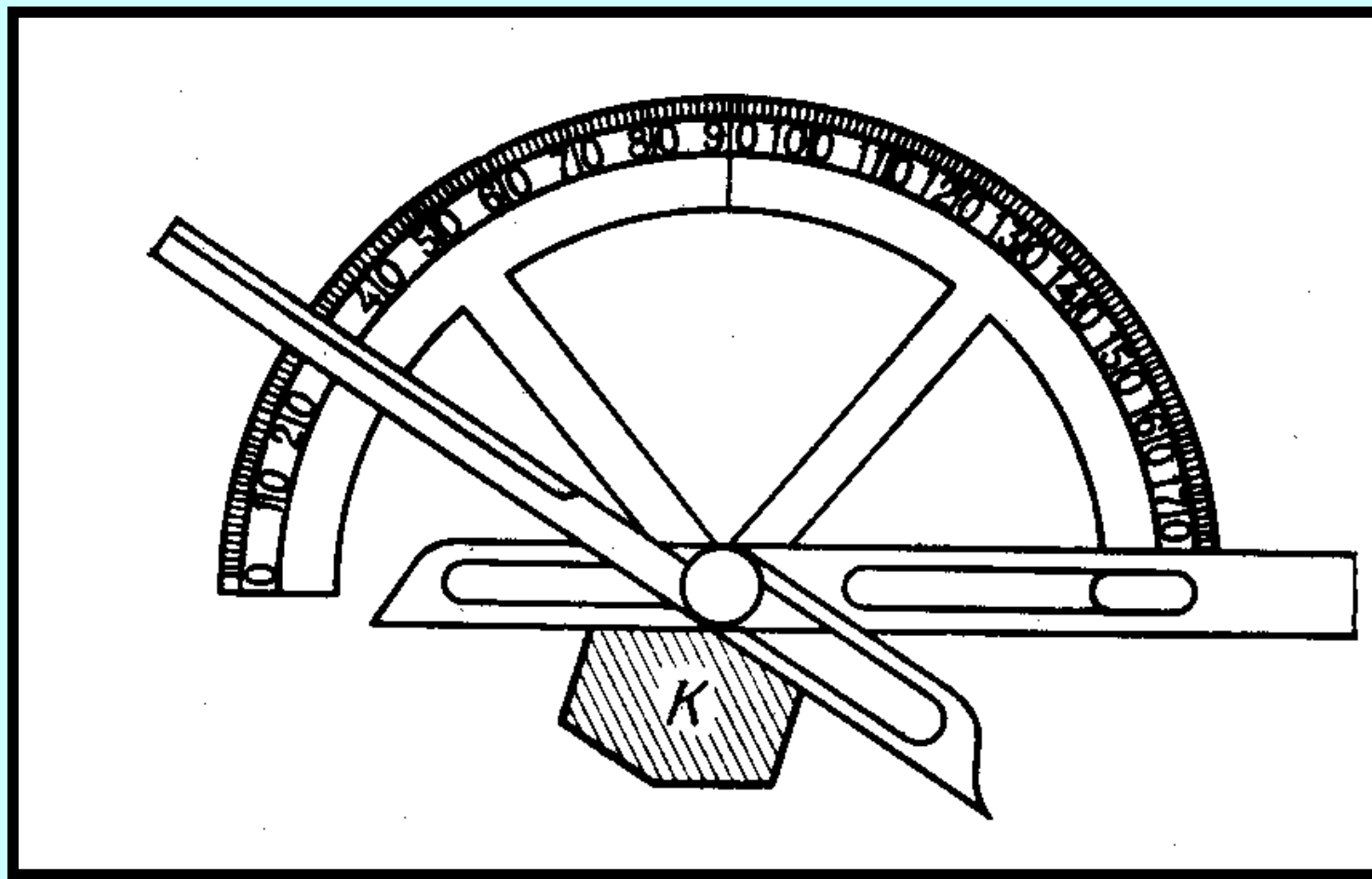
**“Грани кристалла могут изменяться по  
своей форме и относительным размерам,  
но их взаимные наклоны постоянны и  
неизменны для каждого рода кристаллов”**

*Роме-де-Лиль* в двух книгах, опубликованных в  
1772 и 1783 гг. положил начало химической  
кристаллографии как самостоятельной науке



Кристаллы кварца, иллюстрирующие закон постоянства углов

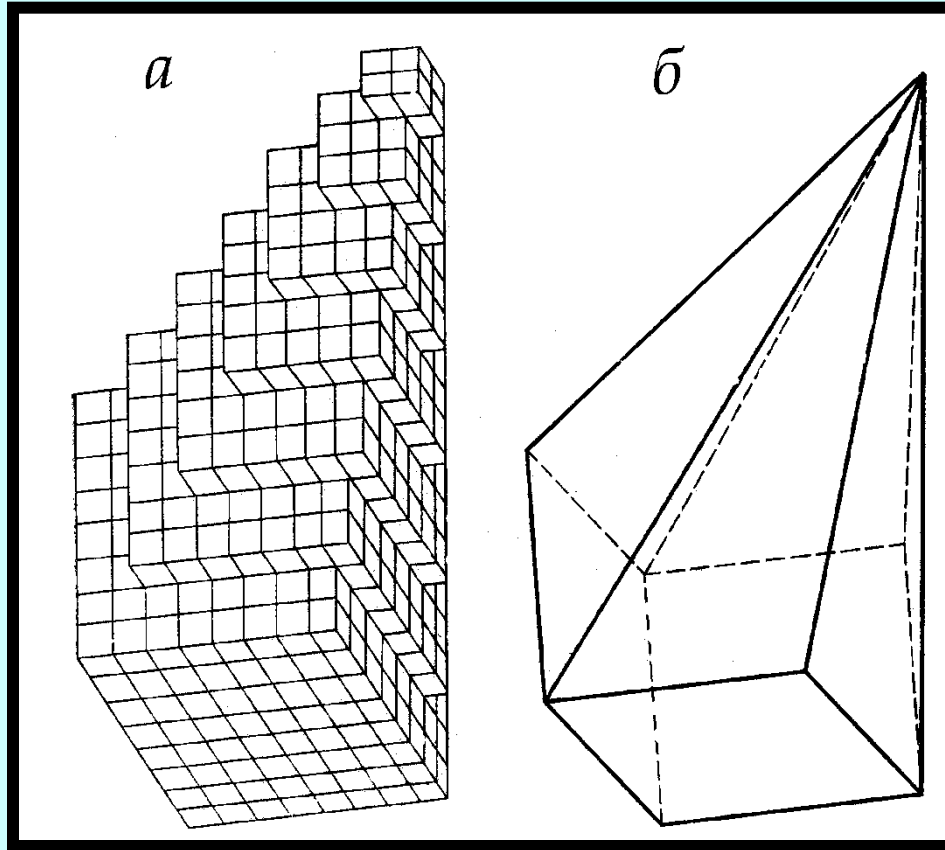
В основу своих трудов Ромэ-де-Лиль кладет законы постоянства форм и постоянства углов кристаллов, которые он измерял с помощью прикладного гониометра М. Каранжо



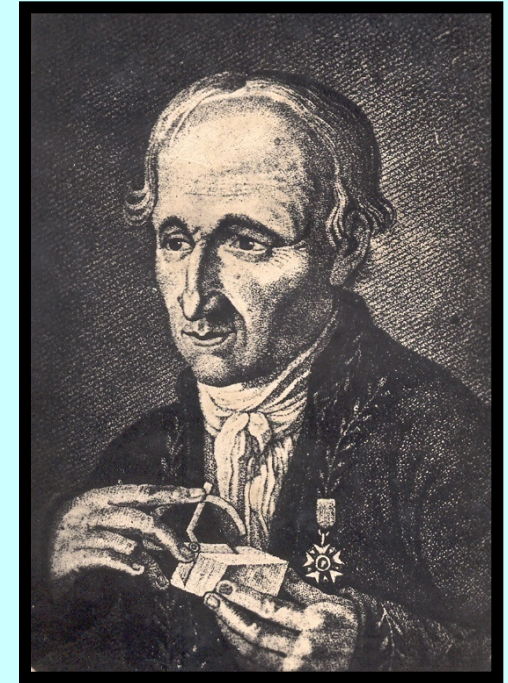
*Прикладной гониометр (К – кристалл)*

**Начало 2-ого этапа**  
**теоретического**  
(или объяснительного)

В отличие от своего соотечественника **Рене-Жюст Аюи (1743-1822)** первым задумался о принципах внутреннего строения кристалла.



Строение кристалла кальцита  
из «параллелепипедальных молекул» (а)  
и образование некоторых граней (б) по *Гаюи*



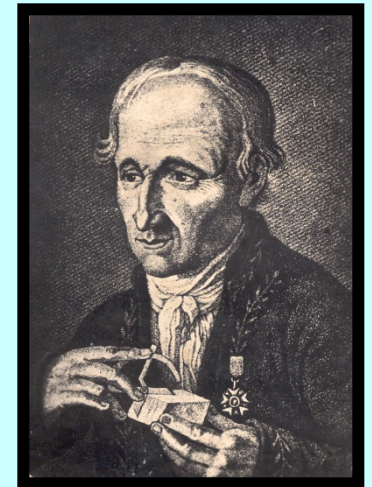
*Рене Жюст Гаюи*  
(1743 – 1822 гг.)

# Волшебство кристаллического мира №2

*В кристаллах нет осей 5-го и выше 6-го  
порядков.*

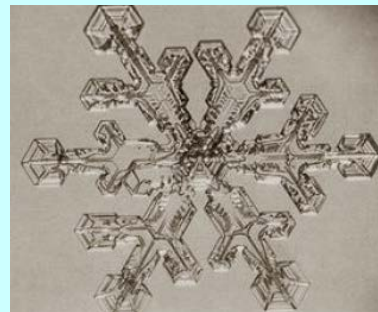
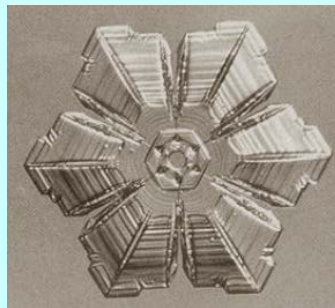
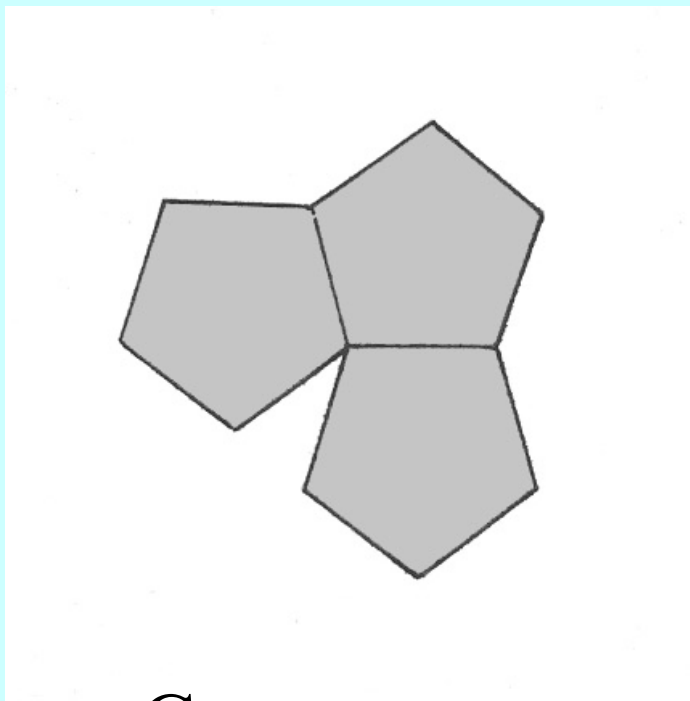
*Основной закон симметрии кристаллов,*  
установленный эмпирически, но  
впоследствии подтвержденный строением  
кристаллов.

*В кристаллических многогранниках  
порядок осей ограничен числами  
1, 2, 3, 4, 6*



*Рене Жюст  
Гаюи (1743 –  
1822 гг.)*

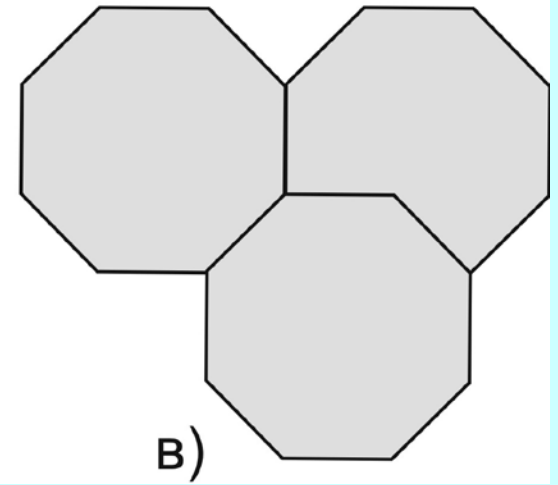
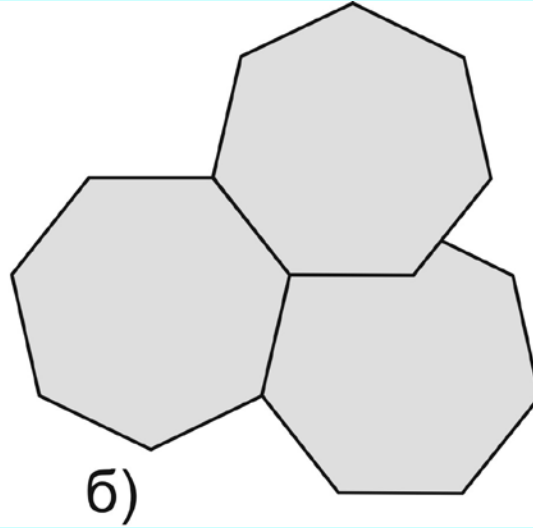
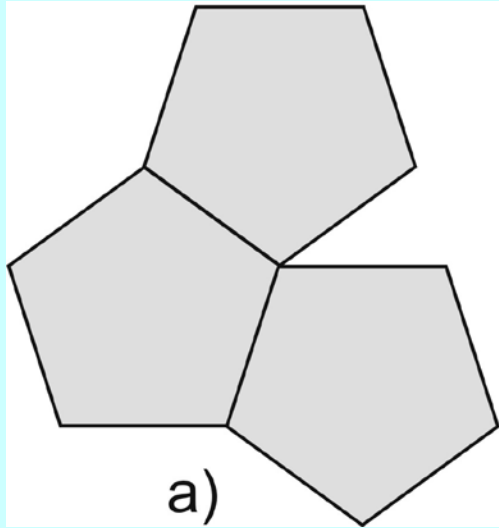
Нельзя правильными пяти- или  $n$ -угольниками  
(где  $n > 6$ ) выполнить все двухмерное  
пространство без остатка



Снежинки всегда 6  
лучевые  
(а цветы — не всегда!)



Шестиугольниками все двухмерное пространство без остатка заполнить можно!!



(доказано пчелами  
МНОГО МИЛЛИОНОВ  
лет назад)

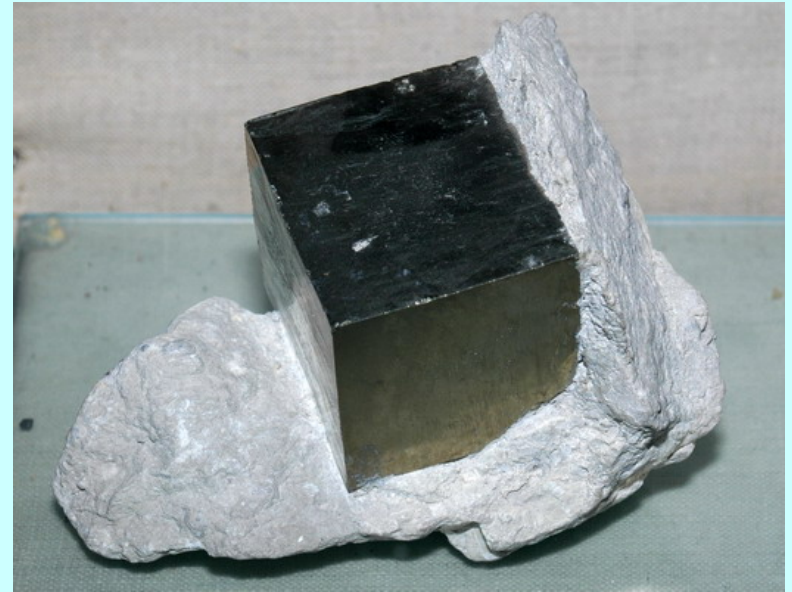
*В кристаллах нет осей порядка  $>6$*



# А В живых организмах ЕСТЬ! $N > 6$



*В кристаллах нет осей 5-го порядка*



# А В живых организмах ЕСТЬ! $N=5$



# Живые организмы любят! оси с $n=5$ и $>6$



Таблица 25. Иголкокожие северной части Тихого океана.

Морские звезды:

- 1 — *Pycnopodia hellantoides*;
- 2 — *Strongylocentrotus nudus*;
- 3 — *Crossaster papposus*;
- 4 — *Distolasterias nipon*;
- 5 — *Evasterias retifera*;
- 6 — *Patiria pectinifera*.

Офиуры:

- 7 — *Strongylocentrotus purpuratus*;
- 8 — *Amphiodia rossica*;
- 9 — *Psolus chitonoides*.

Морские ежи:

- 10 — *Ophiacantha bidentata*;
- 11 — *Brisaster townsendi*;
- 12 — *Stichopus japonicus*.

Голотурии:

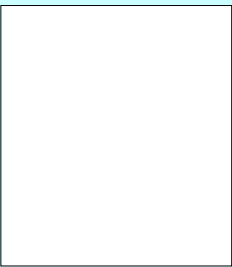
- 13 — *Astromella sertulifera*;
- 14 — *Amphiophiura ponderosa*.

## Почему?



1) Из вредности и повыпендриваться

2) Страх перед неживой природой



Христиан  
Самуил Вейс  
(1780-1856)

***Х. С. Вейс***

*(1780 – 1856 гг.) разработал другой  
важнейший закон кристаллографии - **закон  
зон (поясов)***



Мо  
Ф

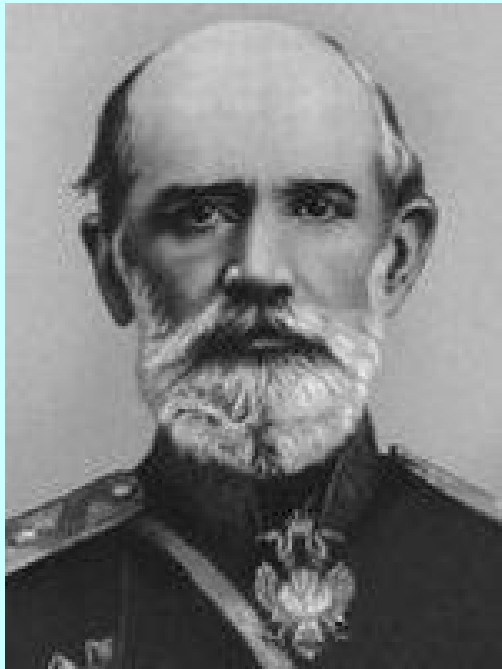
*В 1826 г. немецкий кристаллограф  
**М. Л. Франкенгейм***

*(1801-1869 гг.) вывел 32 класса симметрии.*



Иоганн  
Христиан  
(1

***И. Ф. Х. Гессель** (1796-1872 гг.)  
в 1830 г. вывел 32 класса симметрии*



А. В. Гадолин  
(1828 - 1892 гг.)

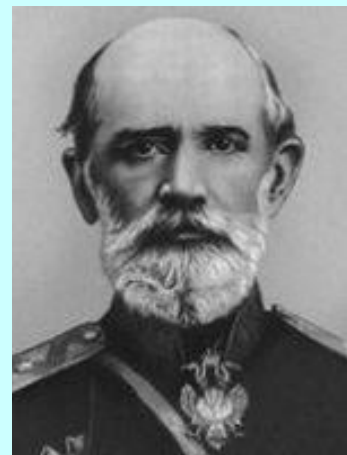
К сожалению, труды Франкенгейма и Гесселя остались незамеченными, причина этому крылась в неподготовленности большинства минералогов того времени к восприятию идей, имеющих математическую природу.

И только в 1867 г. **А. В. Гадолин**, строго выводит 32 группы - совокупности элементов симметрии, которые могут существовать в кристаллических многогранниках, и разбивает их на 6 кристаллографических систем: триклинную, моноклинную, ромбическую, тетрагональную, гексагональную и кубическую.

# Аксель Вильгельмович Гадолин (1828-1892)

русский учёный в области артиллерийского вооружения, механической обработки металлов, минералогии и **кристаллографии**, с 1875 года действительный член Петербургской АН, с 1873 г. член-корреспондент, генерал от артиллерии (1890).

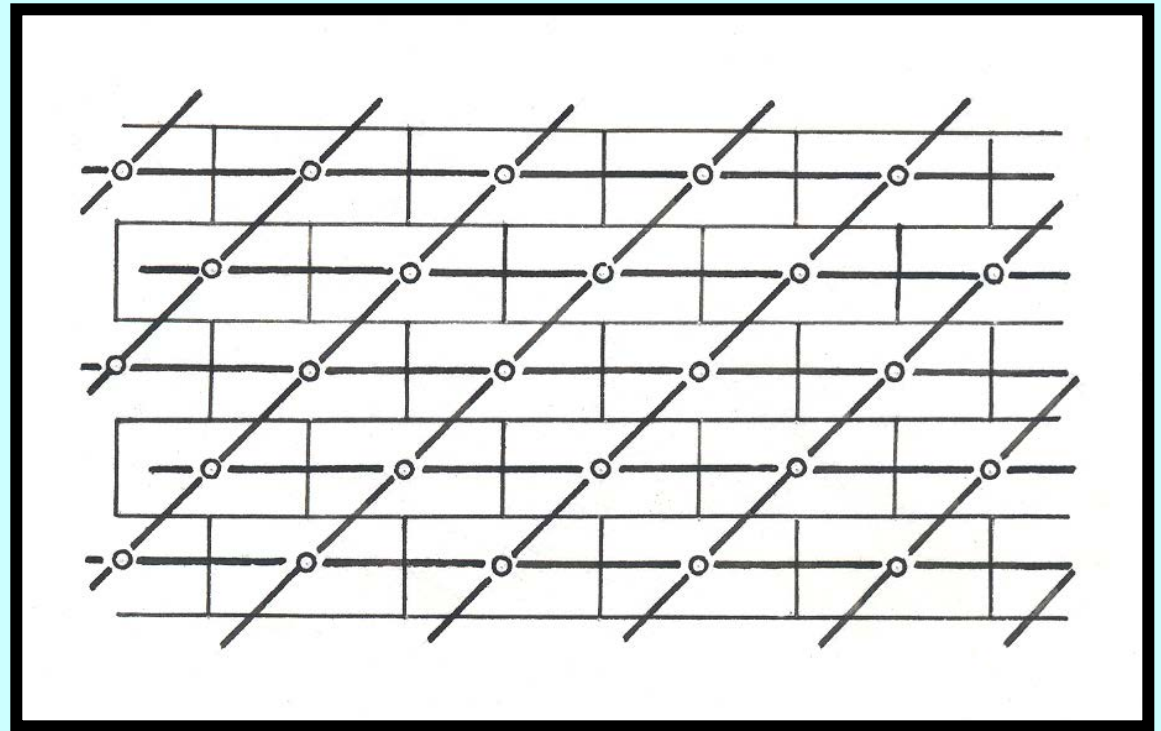
За оказанные военные подвиги 1854-1855 годов награждён орденом св. Георгия 4-й степени.



В 1850 г. французский **кристаллограф** Огюст Браве издает “Мемуар о системах точек, правильно распределенных на плоскости и в пространстве”, содержащий классический вывод **14 пространственных решеток**. С узлами этих решеток Браве связал центры молекул кристаллических тел.



*Огюст Браве  
(1811-1863 гг.).*



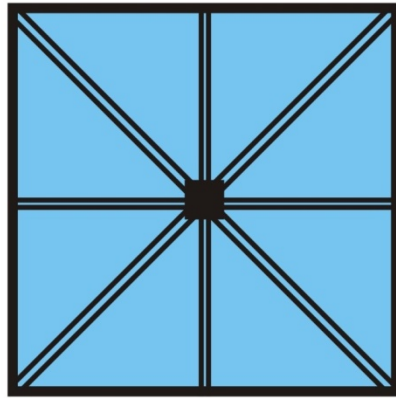
Параллелепипедальная решетка,  
которой подчиняется кирпичная кладка



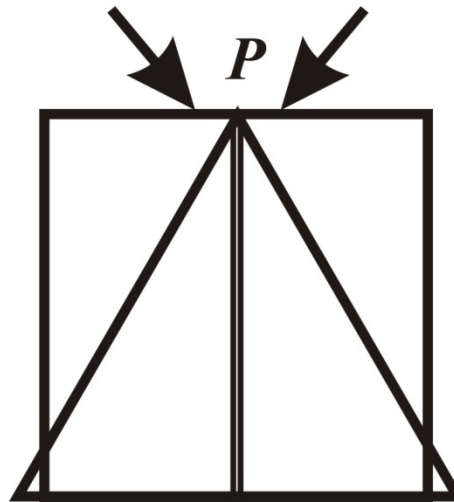
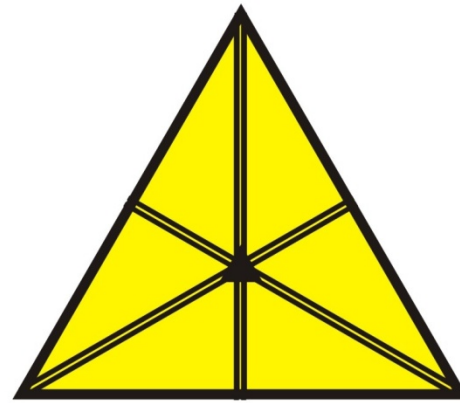
Пьер Кюри  
(1859 – 1906)

*Пьер Кюри сформулировал  
универсальный закон  
симметрии (диссимметрии):  
В результате наложения  
нескольких явлений различной  
природы, каждое из которых  
обладает своей собственной  
симметрией, в одной и той же  
системе сохраняются лишь  
совпадающие элементы  
симметрии этих явлений.*

$L_4 2P'2P''$



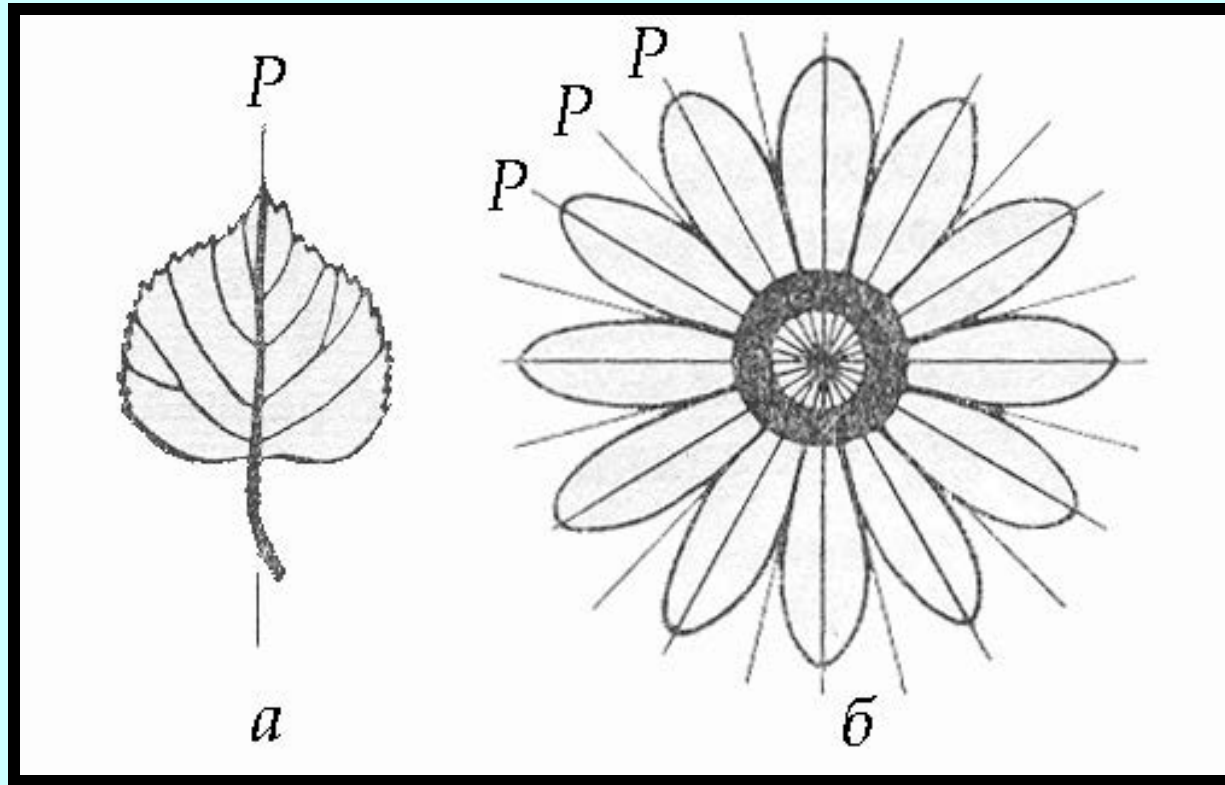
$L_3 3P$



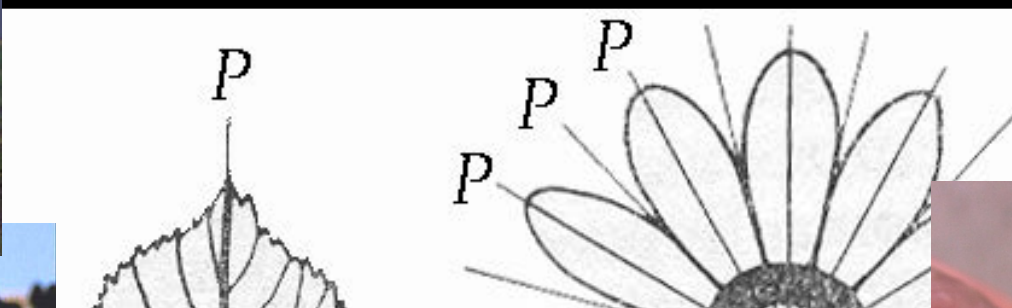
Демонстрация принципа суперпозиции Кюри: в результате наложения двух фигур – квадрата с симметрией  $L_4 2P'2P''$  и треугольника с симметрией  $L_3 3P$  остается только общий элемент симметрии –  $P$ .

## Иллюстрация закона Кюри:

лист обладает одной плоскостью симметрии -  $P(a)$ ,  
цветок — радиально-лучистой симметрией ( $\delta$ )

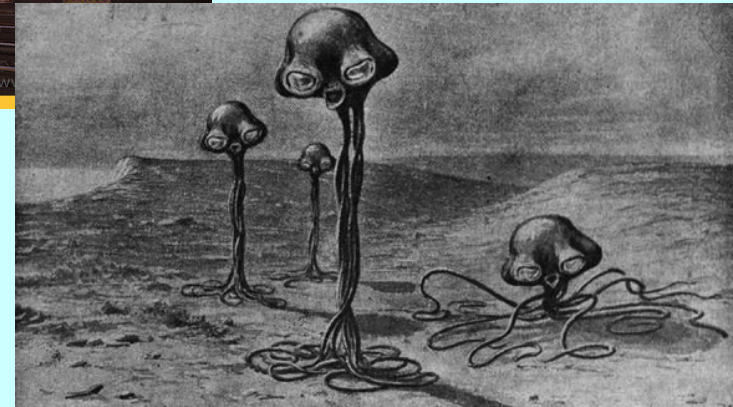


Все, что растет, активно движется по горизонтали или косо к земной поверхности, характеризуется симметрией листка ( $P$ ). Все, что растет и движется только по вертикали, имеет симметрию цветка  $L_n P$



## Вывод 1

**Герберт Уэллс и особенно иллюстраторы его романа не знали принцип Кюри и кристаллографию, когда писали и оформляли Войну миров**



## Вывод 2

**Георгий Остер и его художник были лучшк знакомы с принципом Кюри и кристаллографией, когда придумывали задачу 47 из Вредного Задачника**

**Задача 47.** Инопланетяне, посетившие школу №141, резко отличаются от жителей Земли. У каждого из них по 4 руки, 4 ноги и 2 совести. На сколько меньше всего перечисленного у ученика этой школы Степана Стульчикова, если известно, что рук и ног у него столько же, сколько у обычного человека, а совести нет совсем?



## Вывод 3

Сейчас в аудитории находится

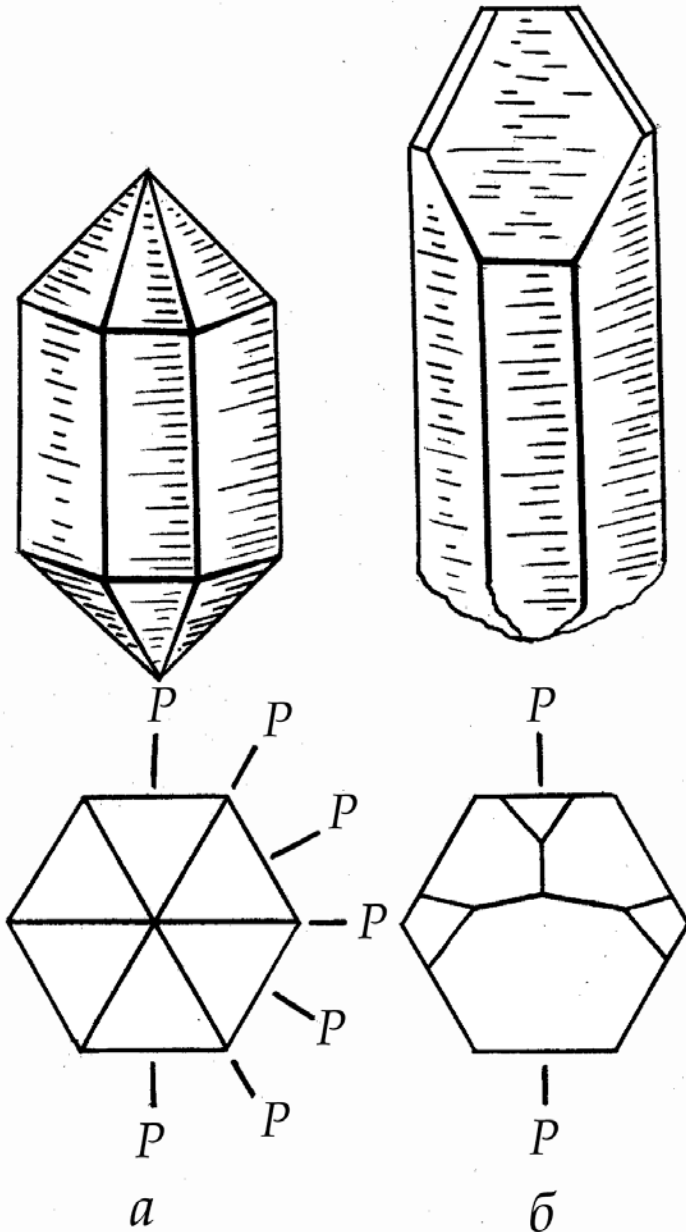


Кто здесь!?

## Неприятный для нас факт

Кристаллы кварца, выросшие с вертикально (а) и наклонно (б) ориентированной главной осью.

В первом случае направление роста совпадает с направлением вектора силы тяжести, и кристалл приобретает радиально-лучистую симметрию; во втором – векторы роста и силы тяжести не совпадают, и в кристалле реализуется лишь одна плоскость симметрии.

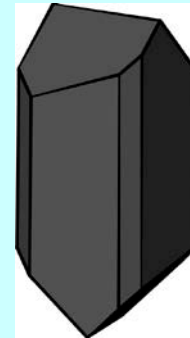
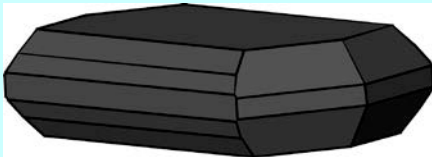


## Неприятный для нас факт

Какой неутешительный вывод приходится сделать? В реальных условиях для выращивания идеальных кристаллов все оказывается достаточно неприятно: симметрия неизбежно понижается, хотя бы под действием закона всемирного тяготения. Не забудем и то, что кристалл растет исключительно медленно и за время его роста условия меняются неоднократно. Неудивительно, что существенное время на орбите международных космических станций космонавты проводят за выращиванием кристаллов в «тепличных условиях».

Внешняя среда искусно маскирует истинную симметрию кристалла. Это приводит к тому, одинаковые по своим физическим характеристикам грани могут сильно отличаться в реальном кристалле друг от друга, что может привести к ошибкам в определении симметрии кристалла. В этой связи визуального осмотра образца может оказаться недостаточно, исследователю приходится определять симметрию более строгим образом, а не «на глазок».

# Приятные новости!



На первых порах работаем с идеализированными  
деревянными и пластиковыми моделями где все эти гадости  
выключены

**Взаимодействие 32 классов точечной симметрии с 14 решетками Браве приводит к возникновению особых (трансляционных) элементов симметрии и в конечном счете к 230 пространственным группам**



В 1890 г. *Великий русский кристаллограф*  
**Евграф Степанович Федоров**



и независимо от него немецкий математик **Артур Шенфлис** вывели 230 геометрических законов, которым должно подчиняться расположение частиц в кристаллических структурах.

К чести Шенфлиса, он признал приоритет Федорова в этом открытии, которое по своему значению может быть поставлено в один ряд с открытием Периодического закона.

Большинство крупных кристаллографов были убежденными сторонниками атомистического мировоззрения.

Представление об атомной структуре кристаллов оставалось еще в начале века лишь удобной гипотезой.

Атомистические воззрения, таким образом, вошли в кристаллографию намного раньше, чем в химию, а тем более в физику.

Лишь немногие ученые отстаивали реальность их существования, в том числе *Людвиг Больцман*

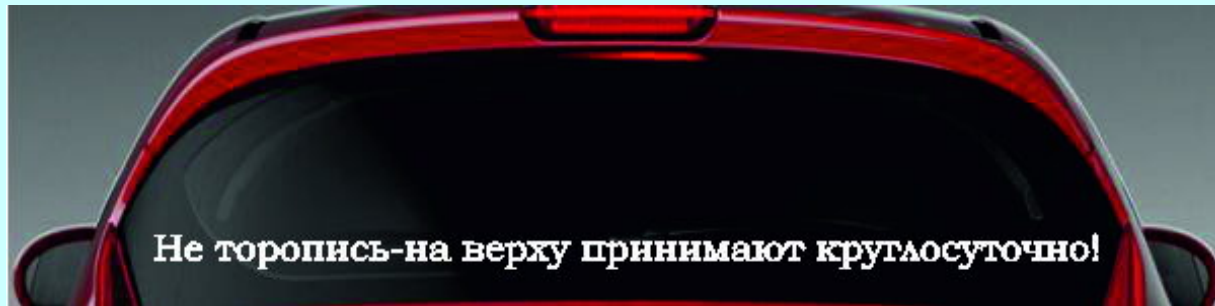
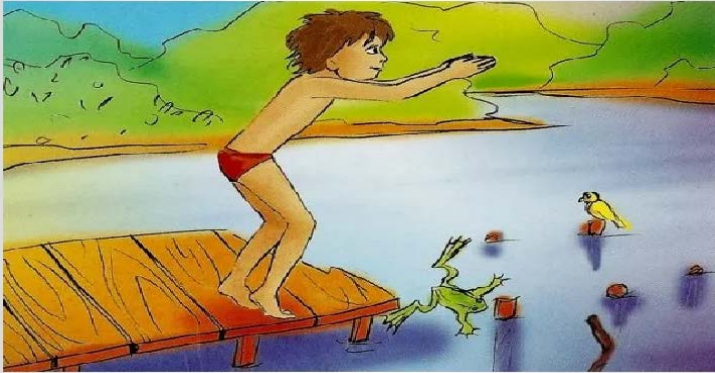
Австрийский физик, член Венской академии наук и многих академий мира. Самыми важными работами Больцмана является классические исследования по кинетической теории газов и статистическому истолкованию второго начала термодинамики



Считая, однако, что это недоказуемо еще примерно 300 лет и что его борьба безуспешна, Больцман покончил с собой в 1906 году ...

# Выводы из этой истории

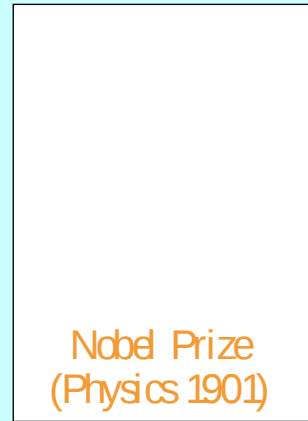
В незнакомом месте не ныряй!



Больцман покончил с собой в 1906 году .. всего за **6 лет** до открытия атомного строения материи.

**Начало 3-его периода**  
**(экспериментального**  
*с прикладным направлением)*

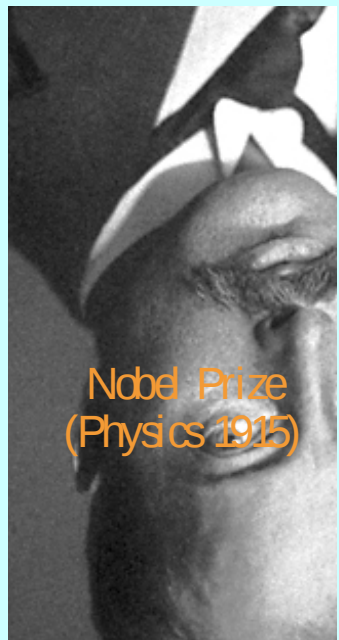
*В. К. Рентген* (1845 – 1923 гг.) в 1895 г открыл X-лучи.



Nobel Prize  
(Physics 1901)

Вильгельм  
Конрад Рентген  
(1845-1923)

В 1912 г. немецким физиком *М. Лауэ* открыто явление дифракции рентгеновских X-лучей на кристаллах и таким образом доказано атомное строение кристалла.



Nobel Prize  
(Physics 1915)

Лауэ показал, что кристаллы действительно построены, как трехмерные атомные «решетки»

Лауэ выбрал для опытов низко-симметричные кристаллы медного купороса  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Поэтому рентгенограмма получилась сложной, и по ней не удалось сказать ничего определенного о внутренней структуре кристалла

Nobel Prize  
(Physics 1915)



Георгий  
Викторович  
Вульф  
(1863-1925)

В том же 1912 г.  
**У.Л.Брэгг** повторил  
опыт Лауэ, взяв  
кристаллы высокой  
симметрии ZnS и NaCl.  
На этот раз оказалось,  
что симметрия  
рентгеновского снимка  
соответствует  
симметрии кристалла.

В том же году был определен простой закон отражения  
рентгеновских лучей атомными плоскостями, известный теперь как  
*формула Брэгга*. Чуть позже Брэгга ту же формулу вывел русский  
кристаллограф **Г.В.Вульф**

К 1920 г. было сделано уже несколько десятков  
структурных расшифровок.

# Начало 4-ого этапа (предсказательного)

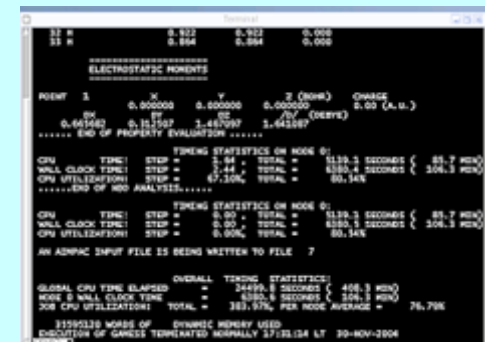
В XXI веке появилась принципиальная возможность предсказывать структуры и свойства не синтезированных, гипотетических кристаллов.

Физический эксперимент можно (*еще не всегда но уже часто*) с успехом заменить **математическим**.

РСИ

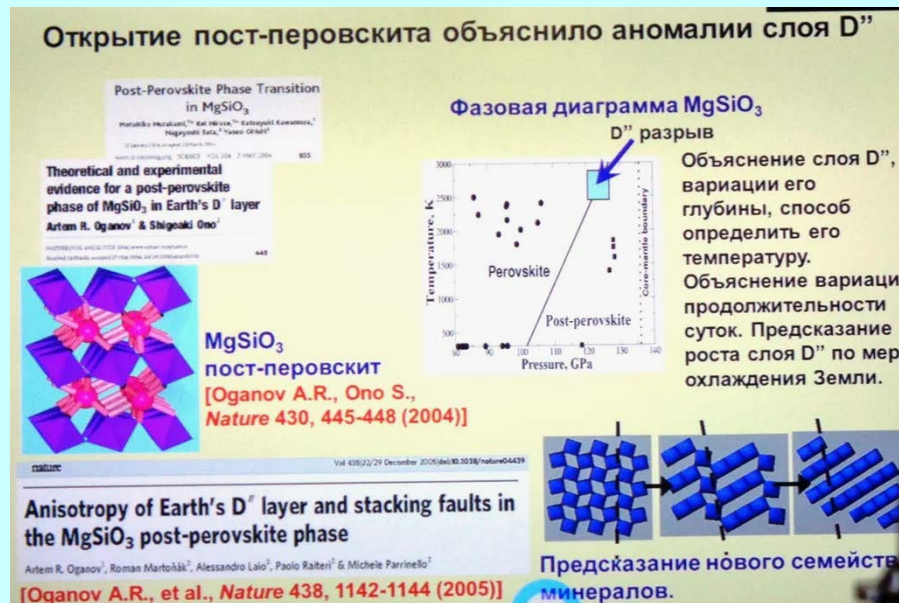


*ab initio*



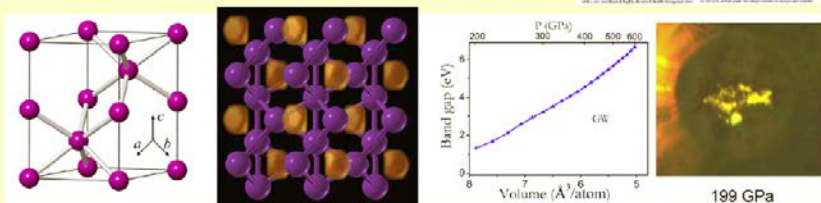
$$\rho(r)$$

# Начало 4-ого этапа



We have predicted a new structure – a transparent non-metal!

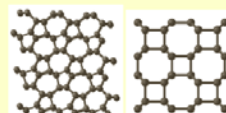
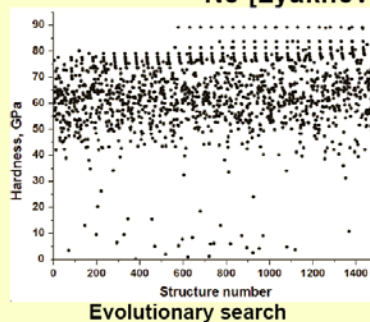
Sodium becomes transparent at pressures ~2 Mbar  
 (Ma, Eremets, ARO et al., Nature 2009)



Electrons are localized in the «empty space» of the structure, which makes compressed sodium an insulator

Such substances are called «electrides» (by analogy with chlorides, fluorides, etc.)

Are carbon allotropes harder than diamond possible?  
 No [Lyakhov & Oganov, 2011].



All superhard structures have  $\text{sp}^3$ -hybridization

| Structure    | Knoop hardness, GPa | Enthalpy, eV/atom |
|--------------|---------------------|-------------------|
| Алмаз        | 89.7                | 0.000             |
| Лонсдейлит   | 89.1                | 0.026             |
| $C2/m$       | 84.3                | 0.163             |
| $I4/mmm$     | 84.0                | 0.198             |
| $Cmcm$       | 83.5                | 0.282             |
| $P2_1/m$     | 83.4                | 0.166             |
| $I2_12_12_1$ | 82.9                | 0.784             |
| $Fmmm$       | 82.2                | 0.322             |
| $Cmcm$       | 82.0                | 0.224             |
| $P6_322$     | 81.3                | 0.111             |

*«Она (кристаллография) дает уму некоторое удовлетворение и является в своих частностях столь разнообразной, что может быть названа неиссякаемой, благодаря чему она прочно и надолго захватывает выдающихся людей»*

*И.В. Гете*



# КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

Организация Объединенных Наций

A/RES/66/284



Генеральная Ассамблея

Distr.: General  
12 July 2012

Шестьдесят шестая сессия  
Пункт 14 повестки дня

## Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей

[без передачи в главные комитеты (A/66/L.51 and Add.1)]

### 66/284. Международный год кристаллографии

Генеральная Ассамблея,

ссылаясь на резолюцию 1980/67 Экономического и Социального Совета от 25 июля 1980 года о международных годах и годовщинах и на резолюции Генеральной Ассамблеи 53/199 от 15 декабря 1998 года и 61/185 от 20 декабря 2006 года о провозглашении международных годов,

признавая, что понимание человеком материальной природы окружающего мира основывается, в частности, на нашем знании кристаллографии,

подчеркивая, что изучение и прикладное использование кристаллографии играют исключительно важную роль в борьбе с такими вызовами, как болезни и экологические проблемы, позволяя получить данные о структуре белков и низкомолекулярных соединений, подходящих для разработки лекарственных препаратов, крайне важных для медицины и общественного здравоохранения, а также для решения проблем загрязнения растений и почвы,

признавая, что с кристаллографией мы сталкиваемся повсеместно в своей повседневной жизни, в разработке современных лекарственных препаратов, в областях нанотехнологии и биотехнологии, и что кристаллография лежит в основе разработки всех новых материалов — от зубной пасты до компонентов самолетов,

принимая во внимание важное значение научных достижений в области кристаллографии, подтвержденное тем, что Нобелевская премия 23 раза присуждалась за исследования в этой области, и то, что кристаллография по-прежнему представляет собой плодородную почву для новых и многообещающих фундаментальных исследований,

принимая также во внимание отмечаемое в 2014 году столетие зарождения современной кристаллографии и признание того, что она является самым действенным инструментом определения структуры вещества,

сознавая, что 2014 год открывает возможности для развития международного сотрудничества в рамках празднования шестидесятилетней годовщины основания Международного союза кристаллографии,

отмечая, что мировое сообщество кристаллографов с большим удовлетворением восприняло идею провозглашения 2014 года Международным годом кристаллографии,

признавая ведущую роль Международного союза кристаллографии, являющегося членом Международного совета по науке, в координации и содействии развитию деятельности в области кристаллографии на международном, региональном и национальном уровнях во всем мире,

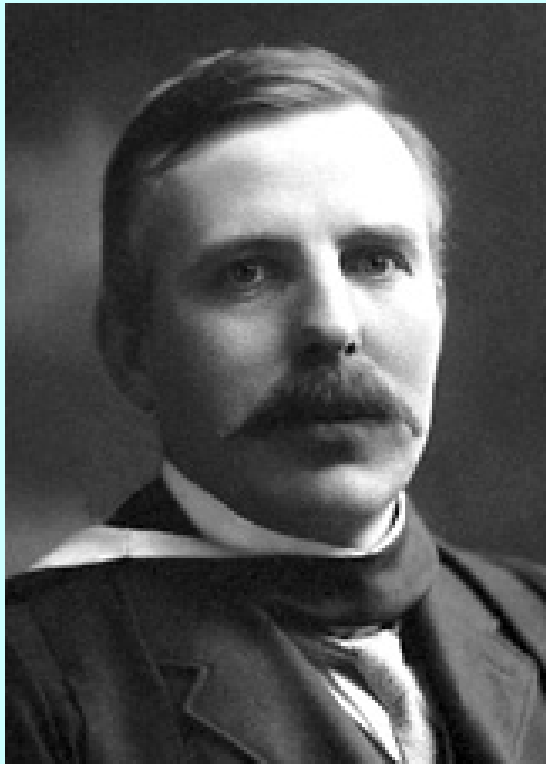
1. постановляет провозгласить 2014 год Международным годом кристаллографии;

2. предлагает Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры, принимая во внимание положения приложения к резолюции 1980/67 Экономического и Социального Совета, в сотрудничестве с правительствами, Международным союзом кристаллографии и связанными с ним организациями во всем мире, соответствующими организациями системы Организации Объединенных Наций, Международным советом по науке, а также другими соответствующими неправительственными организациями, содействовать проведению Международного года кристаллографии, предлагает также Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры регулярно информировать Генеральную Ассамблею о ходе работы в этой связи и подчеркивает, что расходы на все мероприятия, которые могут возникнуть в связи с осуществлением настоящей резолюции, помимо расходов на мероприятия, предусмотренные в настоящее время мандатом упомянутого учреждения-исполнителя, должны покрываться за счет добровольных взносов, в том числе от частного сектора;

3. рекомендует всем государствам-членам, системе Организации Объединенных Наций и всем другим действующим лицам воспользоваться проведением Международного года кристаллографии для содействия принятию на всех уровнях мер, направленных на повышение уровня осведомленности общественности о значимости кристаллографии и поощрения широкомасштабного доступа к новым знаниям и мероприятиям в области кристаллографии.

121-е пленарное заседание,  
3 июля 2012 года

«All science is either *physics* or  
*stamp collecting*»



# ЛЕКЦИЯ 2



**Волшебные оси**  
*(это выдумка или нет?)*

**Проецирование**  
*(или как изумить Скотта и Амундсена)*

**Теорема Эйлера**  
*(и ее наглядное доказательство с помощью машины времени).*