

Кристаллохимия

(строение кристаллических веществ и материалов)

Курс лекций для студентов химического факультета МГУ

Ю.Л.Словохотов

Примеры кристаллов



аквамарин



топаз



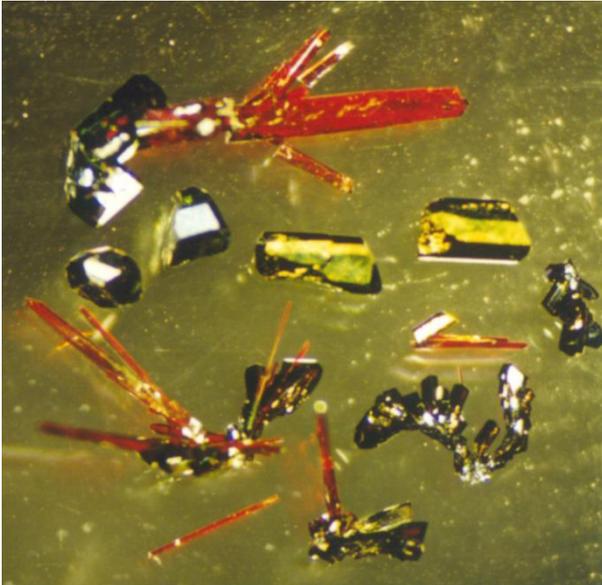
турмалин



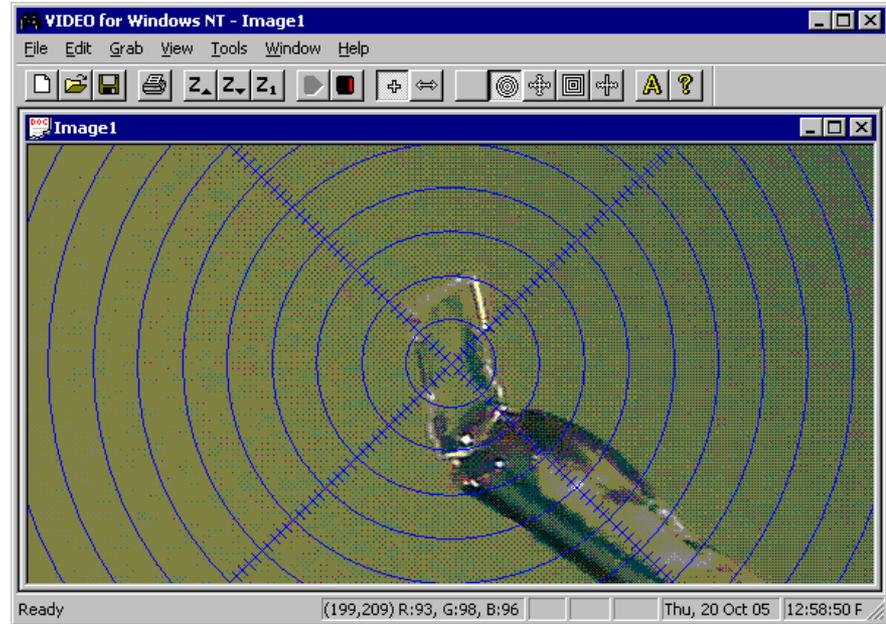
гранат



Так выглядят кристаллы:



под микроскопом



на дифрактометре



в ювелирном деле



в промышленности

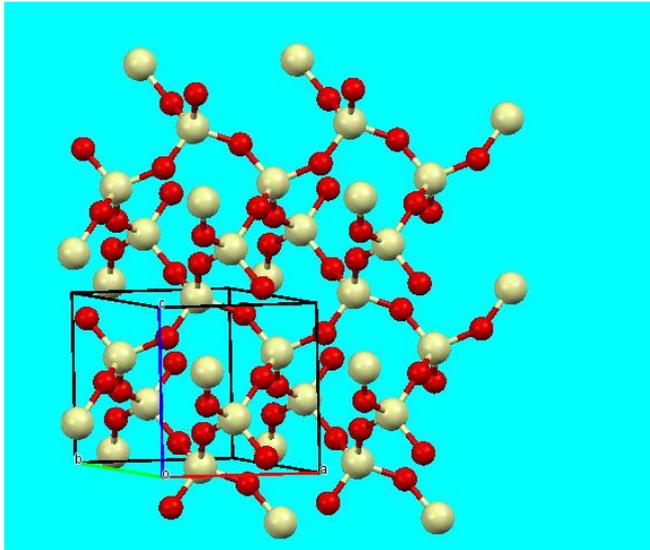
**Дигидрофосфат
калия (KH_2PO_4):
ценный материал
для нелинейной
оптики**

Кристаллы – это бесконечные периодические «фигуры» (структуры), составленные из атомов

Они могут быть одномерными (цепочки), двумерными (слои, пленки) и трехмерными (то, что обычно и называют кристаллами)

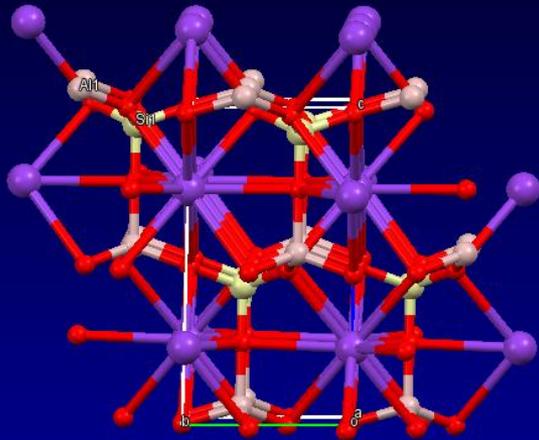
Кристаллохимия – наука об атомном строении кристаллов и его влиянии на физико-химические свойства кристаллических веществ

Примеры кристаллических структур

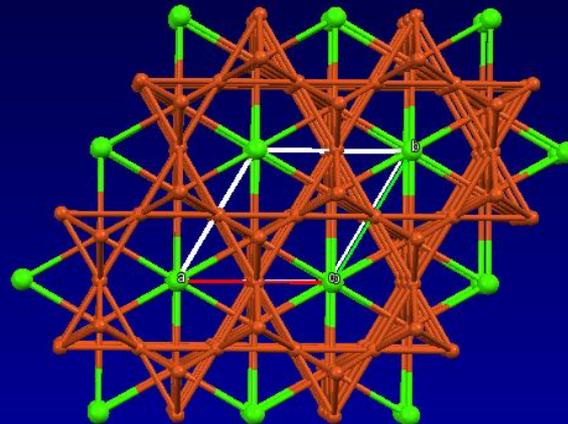


α -кварц (SiO_2)

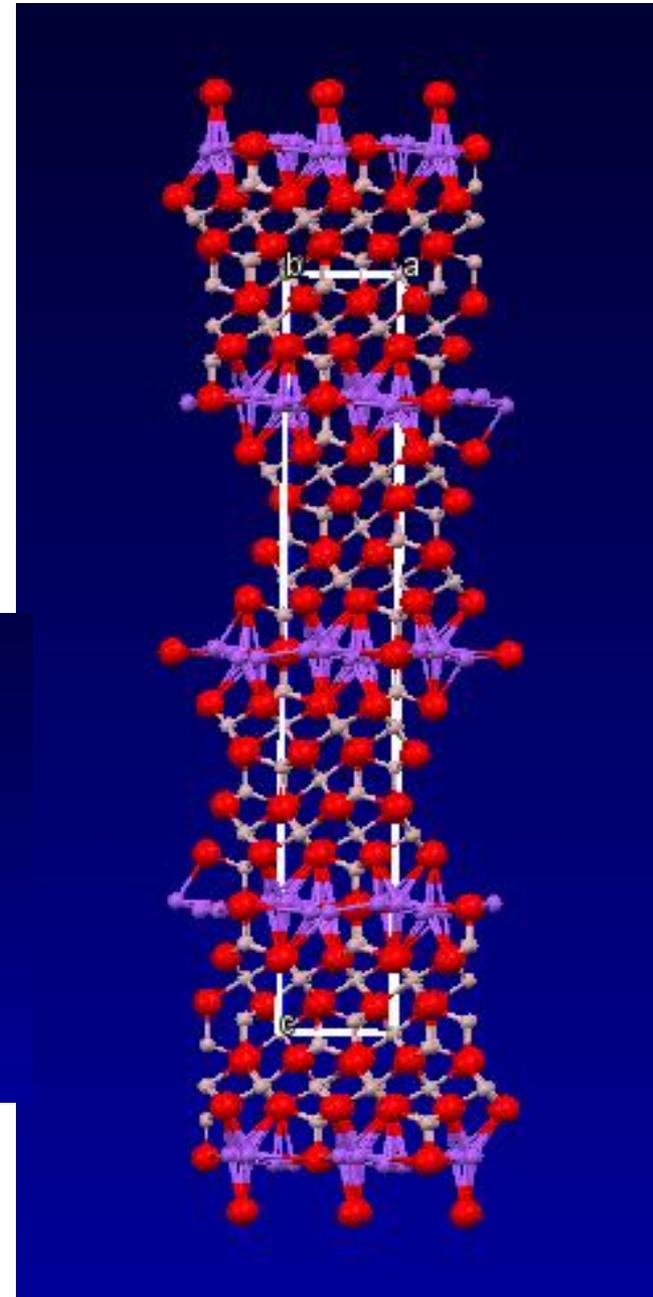
β -глинозем « Al_2O_3 »,
на самом деле
 $\text{Na}_2\text{Al}_{11}\text{O}_{17}$
($2\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$):
ионный проводник



полевой шпат
 KAlSi_3O_8



интерметаллид
 CaCu_5



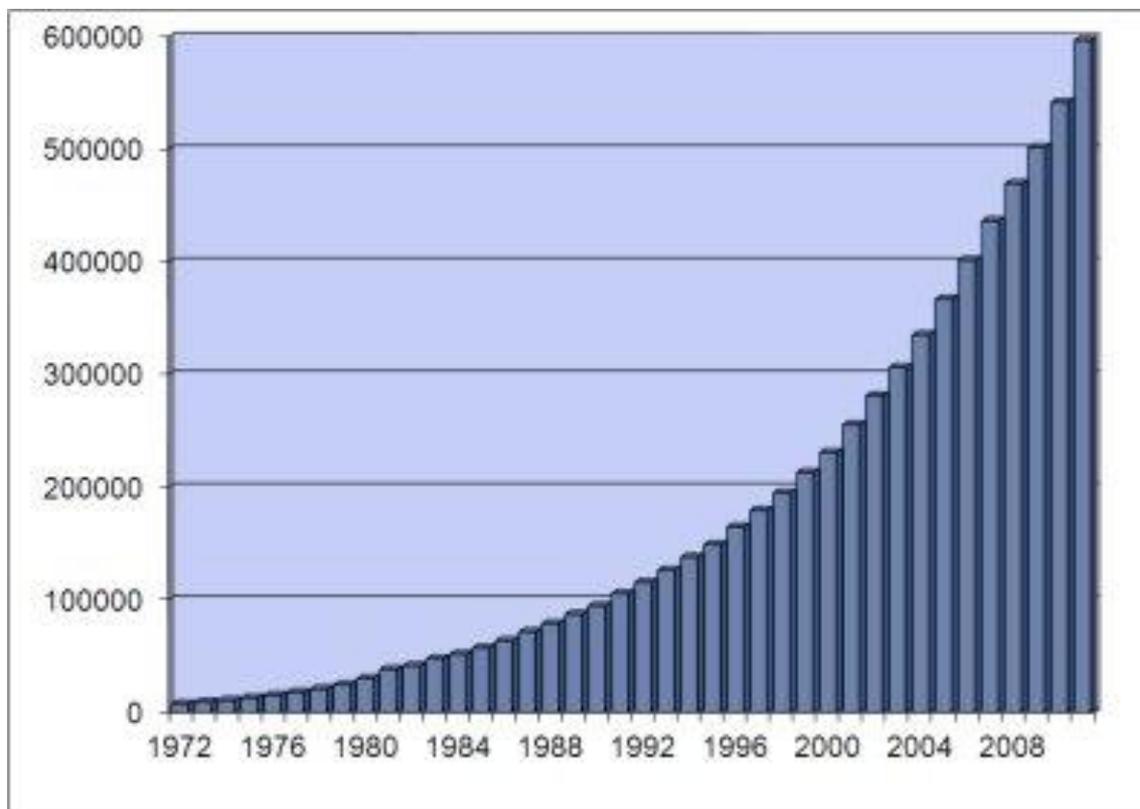


Cambridge Structural Database (CSD), или Кембриджский банк структурных данных (КБСД)

основан в 1965 г.

Год	1970	1983	1990	2001	2009	2016
кол-во стр-р	9000 (2 Мб)	50000	100000	250000	500000	850000 (171 Мб/год)

Рост числа структур в CSD



План курса кристаллохимии

I. Симметрия

1. точечные группы
 - (а) в системе Шенфлиса
 - (б) в системе Германа-Могена
2. кристаллические решетки
3. пространственные группы

II. Важнейшие дифракционные методы

- (а) рентгенофазовый анализ (РФА)
- (б) рентгеноструктурный анализ (РСА)

III. Основные положения кристаллохимии

1. шаровые упаковки, атомные радиусы
2. базовые структурные типы и мотивы

IV. Разделы кристаллохимии

1. простые вещества
2. бинарные и тройные неорганические соединения
3. соли кислородных кислот
4. органические и металлоорганические соединения
5. полимеры и биополимеры

64 ч., 4 часа в неделю (1 лекция + 1 семинар)

ПОСЕЩЕНИЕ ЗАНЯТИЙ **ОБЯЗАТЕЛЬНО**

3 контрольные работы в аудитории

2 практические домашние работы

контрольные домашние задания (ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ)

ЗАНЯТИЯ В КОМПЬЮТЕРНОМ КЛАССЕ

3 дополнительные консультации

ЭКЗАМЕН (при трех оценках «отлично» за контрольные работы – досрочная сдача)

Ожидаемый результат:

умение читать и понимать кристаллографическую и структурно-химическую научную литературу



Лаборатория кристаллохимии

<http://www.chem.msu.ru/rus/lab/phys/crychem/welcome.html>



Заведующий лабораторией - доктор химических наук, профессор
Словохотов Юрий Леонидович
Телефон: (495)-939-54-34
e-mail: slov@phys.chem.msu.ru,
cryst@phys.chem.msu.ru

- [Учебные материалы](#)
- [Полезные ссылки](#)

Сотрудники лаборатории

Основные направления научных исследований

- Исследование строения кристаллов органических и координационных соединений
- Теоретическая неорганическая кристаллохимия
- Структурные исследования частично упорядоченных соединений и материалов
- Комплексное изучение межчастичных взаимодействий в жидких системах
- История химии

Предлагаемые темы работ для студентов и аспирантов

Экспериментальные исследования

- Кристаллическая структура некоторых антагонистов Ca^{2+} и анальгетиков
- Исследование строения наночастиц металлов методами рентгеновской дифракции, малоуглового рентгеновского рассеяния и XAFS-спектроскопии на синхротронном излучении
- Микрогетерогенность в растворах хлорсодержащих веществ
- Объемные и вискозиметрические исследования жидкофазных систем, включая растворы лекарственных препаратов
- Взаимосвязь физических и кристаллографических свойств манганитов редкоземельных металлов – материалов для спинтроники

Теоретические исследования

- Симметричный анализ основных структурных типов неорганических соединений
- Статистический анализ строения и химических превращений органических и металлоорганических соединений по Кембриджскому банку структурных данных
- Связь симметрии и топологии межмолекулярных взаимодействий с физическими характеристиками молекулярных конденсированных фаз

Учебные материалы по курсу кристаллохимии

Лекции по кристаллохимии

Профессор Юрий Леонидович Словохотов

- [Программа курса](#)
- [Лекция 1](#)
- [Лекция 2](#)
- [Лекция 3](#)
- [Лекция 4](#)
- [Лекция 5](#)
- [Лекция 6](#)
- [Лекция 7 \(испр.\)](#)
- [Лекция 8](#)
- [Лекция 9](#)
- [Лекция 10 \(испр.\)](#)
- [Лекция 11](#)
- [Лекция 12](#)
- [Лекция 13](#)
- [Лекция 14](#)
- [Лекция 15](#)
- [Лекция 16](#)

Материалы к лекциям

Структуры кристаллических веществ

Пробная задача по РСА

*Массивы экспериментальных данных
для задач по рентгеноструктурному анализу
любезно предоставили
к.х.н. И.С.Неретин
к.х.н. Ф.М.Долгушин
д.х.н. К.А.Пысенко
СПАСИБО ИМ БОЛЬШОЕ!*

**лекции 2016 г.
в pdf**

- [Методическое пособие, часть 1 \(Словохотов Ю.П.\)](#)
- [Методическое пособие, часть 2 \(Словохотов Ю.П.\)](#)
- [Рентгеновская дифракция \(Богдан Т.В.\)](#)

разработки и пособия по курсу

Вест А. "Химия твердого тела. Теория и приложения"

- Глава 5. "Дифракция рентгеновских лучей" [pdf](#)
- Глава 6. "Точечные группы, пространственные группы, кристаллическая структура" [pdf](#)
- Глава 7. "Описательная кристаллохимия" [pdf](#)
- Глава 8. "Некоторые факторы, влияющие на структуру кристаллов" (отрывки) [pdf](#)
- Глава 13. "Типичные ионные кристаллы" (отрывки) [pdf](#)
- Глава 16. "Примеры магнитных материалов". 16.3.3. "Шпинели" [pdf](#)

Кребс Г. Основы кристаллохимии неорганических соединений

- Главы 9-25 [djvu](#)

Порай-Кошиц М.А. Основы структурного анализа химических соединений

- Глава 1. "Основные понятия и элементы структурной кристаллографии" [pdf](#)
- Глава 2. "Дифракция рентгеновских лучей в кристалле" [pdf](#)
- Глава 3. "Первый этап анализа структуры. Определение параметров решетки и симметрии кристалла" [pdf](#)
- Глава 4. "Основные понятия и элементы структурной кристаллографии" [pdf](#)
- Глава 5. "Сравнительные возможности и перспективы дифракционных методов исследования. Задачи рентгеноструктурного анализа в химии" [pdf](#)

Материалы к лекциям по кристаллохимии

Структуры кристаллических веществ

Структуры сгруппированы по темам лекций, в которых они обсуждаются. Поэтому α - и β -полоний попали в раздел "металлы", а висмут и олово – в "неметаллы". С сайта можно взять файлы *.cif, по которым программы визуализации Diamond и Mercury (они загружаются в разделе "Полезные ссылки" → "Полезные приложения") показывают расположение атомов в элементарной ячейке. Программа Diamond лучше визуализирует структуры с непрерывным трехмерным расположением атомов (металлы, алмаз, NaCl и т.д.), программа Mercury – молекулярные и полимерные структуры (сера, селен, α -N₂ и т.д.). В той и другой программах можно (и нужно) измерять геометрические параметры структурных фрагментов (длины связей, валентные углы, в Mercury – также торсионные углы), размножить структуру на несколько элементарных ячеек, рассчитывать "теоретическую" порошковую рентгенограмму вещества. Программа Diamond также рисует координационный полиэдр выбранного атома. Обе программы представляют структуру в нескольких стилях: 'framework' (сетка химических связей), 'ballsandsticks' (атомы – "сферы", соединенные связями), 'space-filled' (атомы – сферы ван-дер-ваальсовых или ионных радиусов, для молекулярных кристаллов это соответствует моделям Стюарта-Бриглеба).

Обязательные структуры: к контрольной и к экзамену надо уметь нарисовать проекцию элементарной ячейки и описать структуру (число формульных единиц, упаковка атомов, размещение атомов в пустотах, координационные числа и координационные полиэдры). Для них также надо измерить длины связей в 1-й координационной сфере и запомнить их по порядку величины.

Структуры, обсуждаемые качественно, были в лекциях: их надо обязательно просмотреть, обратить внимание на сингонию и измерить важнейшие геометрические параметры (длины связей и валентные углы в 1-й координационной сфере).

Дополнительные структуры логически связаны с материалом лекций: их желательно просмотреть.

Структуры металлов

обязательные	качественно	дополнительные
α-полоний магний медь α-железо α-ртуть Cu₃Au	Цинк α-галлий δ-WC	β-полоний осмий серебро золото α-вольфрам

Структуры неметаллов

обязательные	качественно	дополнительные
алмаз лонсдейлит α-графит хлор	α-олово β-олово α-азот белый фосфор P₄ черный фосфор	бор B-12 бор B-50 сурьма висмут озон O₃

**текстовые файлы name.cif
с кристаллическими структурами
по курсу кристаллохимии**

[O](#)
[Ю](#)
[Hr I](#)
[Hr II](#)
[тур](#)
[I-Br₂](#)
[Cl₂](#)
[Hr I](#)
[иод Hr II](#)

Структуры бинарных и тройных соединений

обязательные	качественно	дополнительные
BaTiO₃ перовскит CaF₂ флюорит хлорид цезия Cu₂O куприт Li₂O	α-Al₂O₃ корунд BeCl₂ BN гексагональный BN кубический CdCl₂ CdI₂	γ-Al₂O₃ шпинель FeTiO₃ ильменит MgB₂ NbS₂

Структуры некоторых солей

качественно	дополнительные
K₂PtCl₆ циркон ZrSiO₄ кальцит арагонит	доломит CaMg(CO₃)₂ NaNO₃ K₂PtCl₄ Cd(CN)₂ берлинская лазурь Fe_xFe(CN)₆



Химический факультет МГУ

Лаборатория кристаллохимии

Полезные ссылки

- [Международный союз кристаллографов \(учебные материалы\)](#)
- [Курчатовский центр синхротронного излучения и нанотехнологий](#)
- [Кембриджский банк структурных данных](#)
- [Банк кристаллических структур неорганических соединений](#)
- [Банк белковых структур](#)
- [Старый сайт](#)
- [Сайт Гриневой О.В.](#)

сайты Международного союза кристаллографов, Курчатовского центра СИ, банков структурных данных

Полезные приложения

- [Diamond](#) (demo-версия, Windows)
- [Mercury](#) (академическая версия, Windows/Linux/Max OS X)
- [Olex2](#) (BSD лицензия, требуется регистрация, Windows/Linux/Max OS X)

программы визуализации структур, программы для РФА и РСА



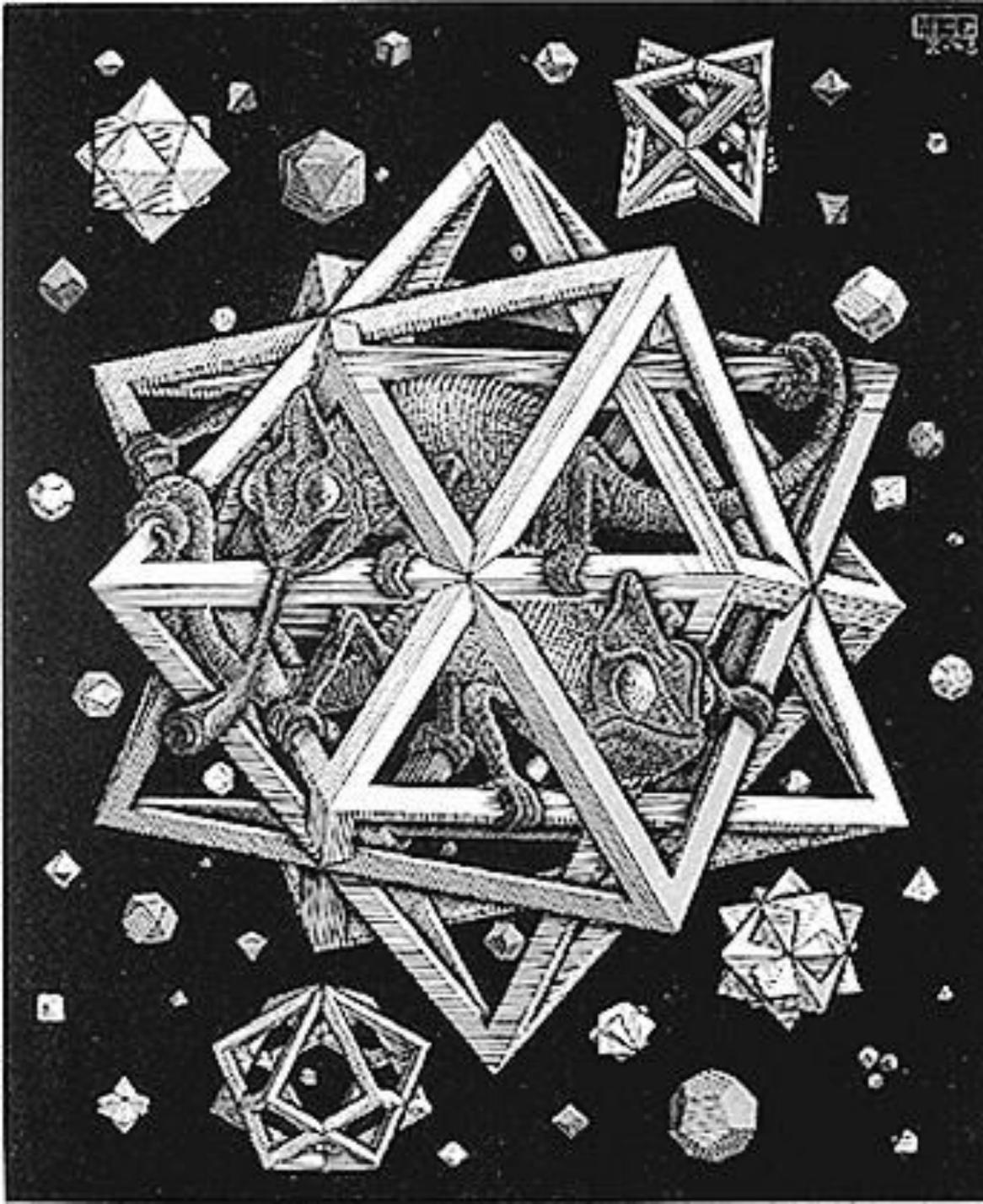
Поиск по серверу

Сервер создается при поддержке [Российского фонда фундаментальных исследований](#)
Не разрешается копирование материалов и размещение на других Web-сайтах
Вебдизайн: Copyright (C) [И. Минайлова](#) и [В. Минайлов](#)
Copyright (C) [Химический факультет МГУ](#)
[Написать письмо редактору](#)

Что дает курс кристаллохимии:

1. «пространственное мышление»,
2. математический аппарат (решетки, группы, тензоры),
3. важнейшие методы структурного исследования,
4. принципы строения конденсированных фаз,
5. основные типы кристаллических структур,
6. направления развития современной кристаллографии

а также общую культуру «структурного» и «геометрического» восприятия реальности



**Что нравится
кристаллографам:
например, рисунки
Маурица Эшера**

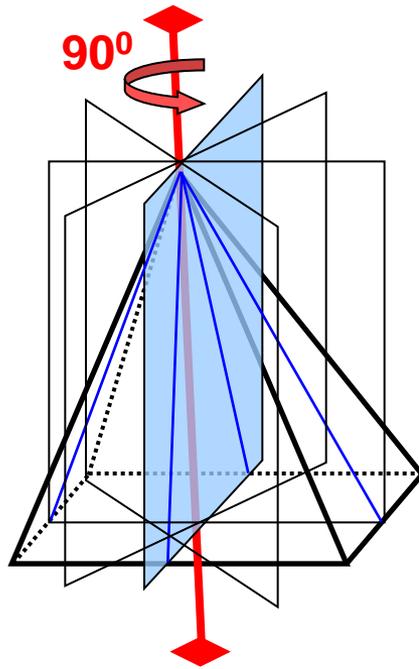
лекция № 1

Симметрия молекул и фигур
Точечные группы

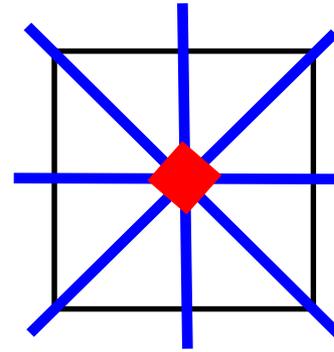
Преобразования геометрической фигуры: любые изменения положения в пространстве всей фигуры или ее составных частей

Фигура **симметрична**, если существуют преобразования, переводящие ее в саму себя («самосовмещение»)
Такие преобразования называются **операциями симметрии**.

Пример: тетрагональная пирамида



(вид сверху)



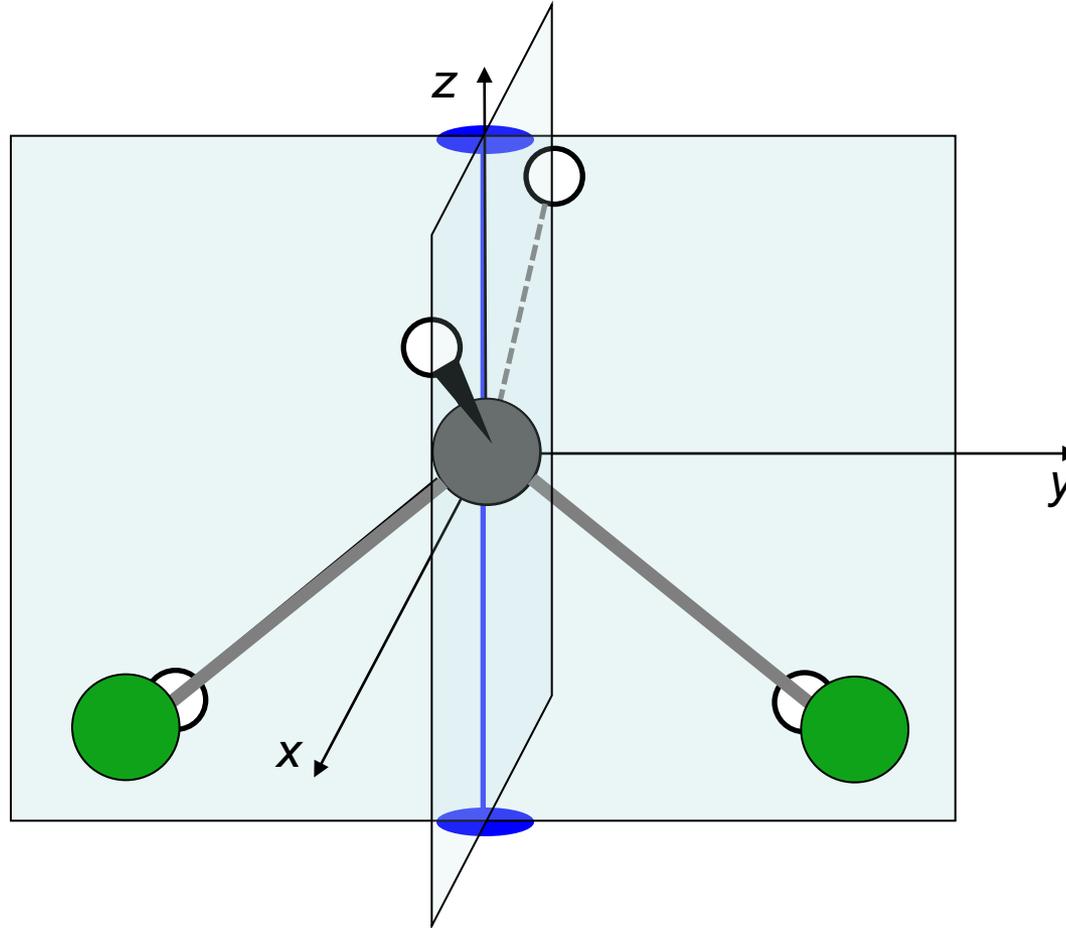
Графический символ операции: **элемент симметрии**

Операции симметрии фигуры **взаимосвязаны**

Совокупность всех операций симметрии фигуры называется ее **группой**

Число операций в группе: **порядок группы**

Молекула H_2O и молекула CH_2Cl_2



точечная группа C_{2v} (σ_{xz} , σ_{yz} , $C_2^{(z)}$, e)

Симметрия конечных фигур: *точечные группы* и *закрытые элементы симметрии*

К одной и той же точечной группе
относятся многие фигуры
(в частности, разные молекулы)

Поэтому для анализа симметрии
достаточно рассмотреть все возможные
расположения элементов симметрии
в трехмерном пространстве
- т.е. *графики* всех точечных групп

Произведение операций симметрии: их последовательное выполнение

Произведение двух любых операций симметрии фигуры = операция симметрии той же фигуры

«взаимодействие элементов симметрии»

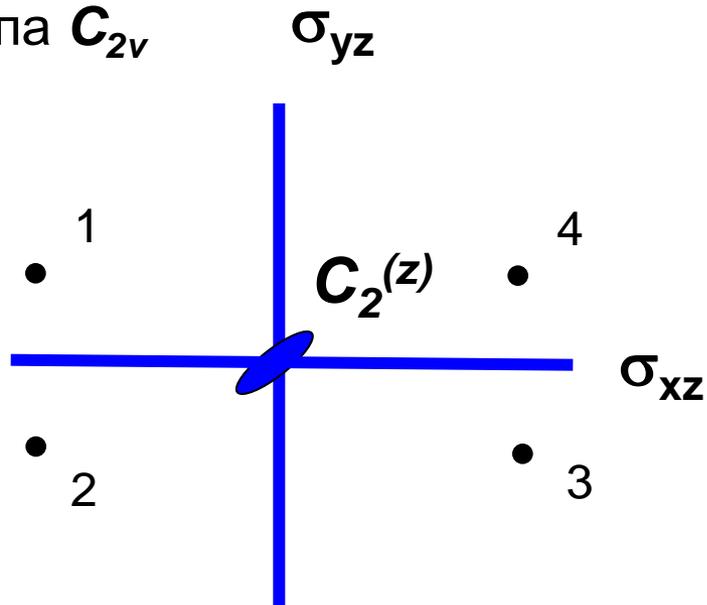
$g_i, g_j \in G$ – элементы группы G
 $g_i g_j = g_k \in G$

$g_1 \cdot g_2 = g_2 \cdot g_1$ – коммутативные (**абелевы**) группы

$g_1 \cdot g_2 \neq g_2 \cdot g_1$ – **неабелевы** группы

Абелевы и неабелевы группы

Группа C_{2v}



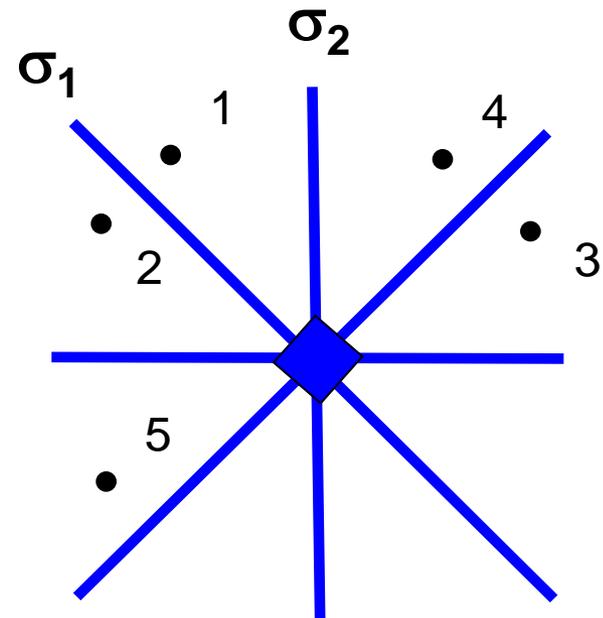
$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3: \sigma_{yz} \sigma_{xz} = C_2(z)$$

$$1 \rightarrow 4 \rightarrow 3: \sigma_{xz} \sigma_{yz} = C_2(z)$$

$$\sigma_1 \sigma_2 = \sigma_2 \sigma_1$$

Умножение коммутативно,
абелева группа

Группа C_{4v}



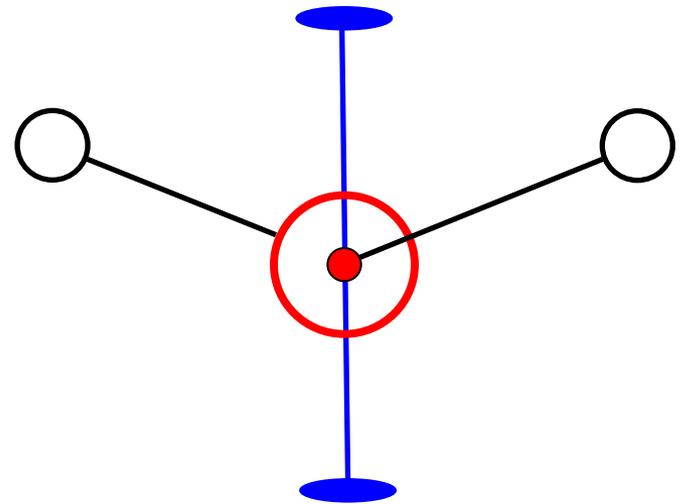
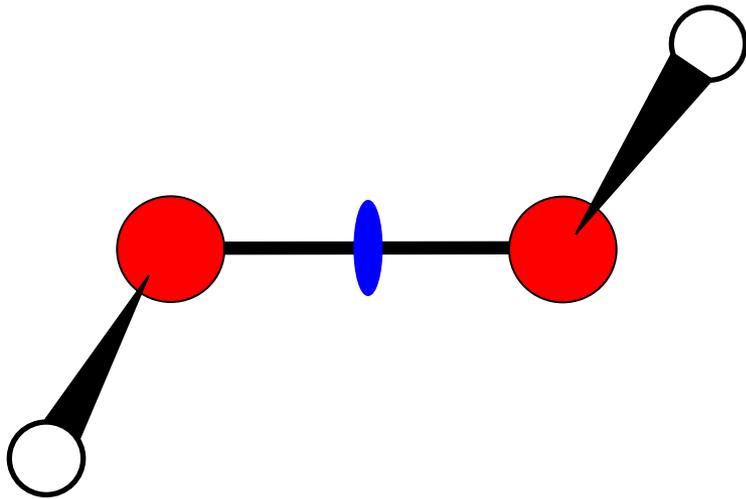
$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3: \sigma_2 \sigma_1 = C_4^1$$

$$1 \rightarrow 4 \rightarrow 5: \sigma_1 \sigma_2 = C_4^3$$

$$\sigma_1 \sigma_2 \neq \sigma_2 \sigma_1$$

Умножение некоммутативно,
неабелева группа

Молекула H_2O_2



проекция Ньюмена

$\mathbf{C}_2 \mathbf{C}_2 = \mathbf{e}$ (тождественное преобразование;
входит в состав любой группы)

группа $\mathbf{C}_2 : \{ \mathbf{C}_2, \mathbf{e} \}$

Группа C_{2v} : $\{e, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}, C_2^{(z)}\}$

Группа C_2 : $\{e, C_2\}$



Если в группе G есть такие операции симметрии, которые сами образуют группу G_1 , набор этих операций называется подгруппой:

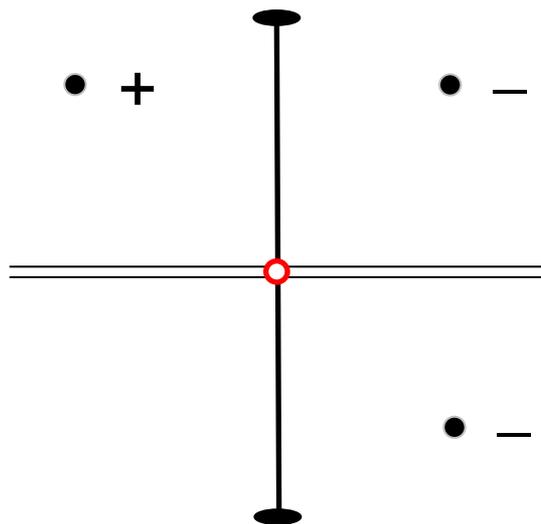
$$G_1 \subset G$$

например, $C_2 \subset C_{2v}$

порядок группы = $m \times$ (порядок подгруппы)

где m – целое число

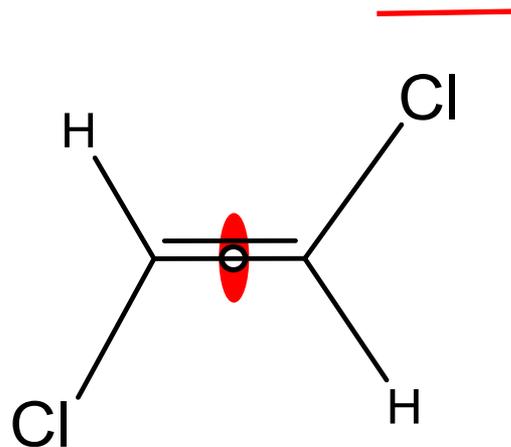
Операция инверсии (*i*)



$$(x, y, z) \rightarrow (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

Группа C_{2h} : $\{e, C_2^{(z)}, \sigma_{xy}, i\}$

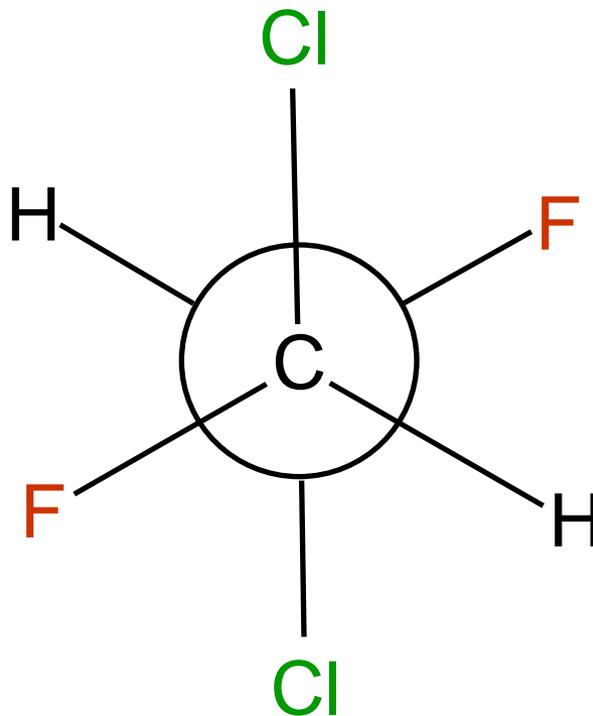
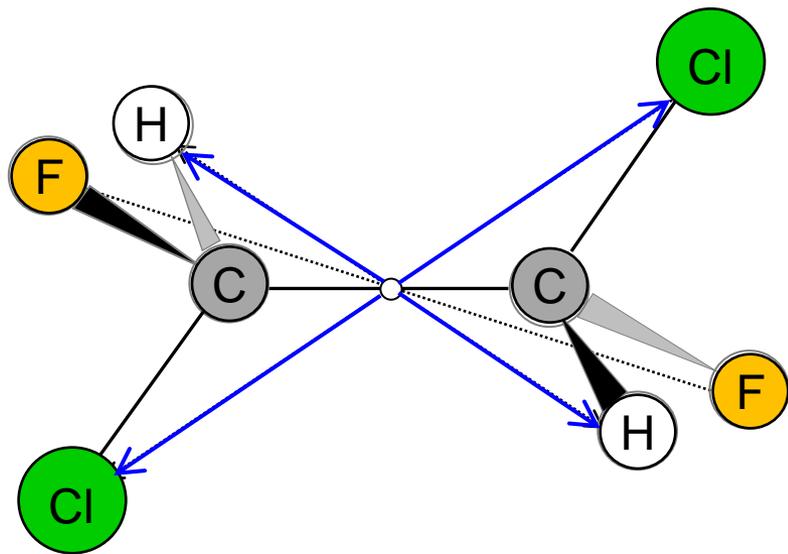
$$C_2 \sigma_h = i$$



транс-дихлорэтилен

Поворот на 180° (C_2), отражение (σ), инверсия (*i*) –
элементы симметрии порядка 2

Группа C_i : мезо-форма фреона $\overset{*}{C}HFCl-\overset{*}{C}HFCl$



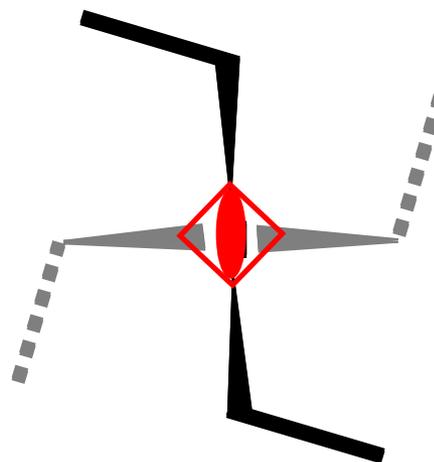
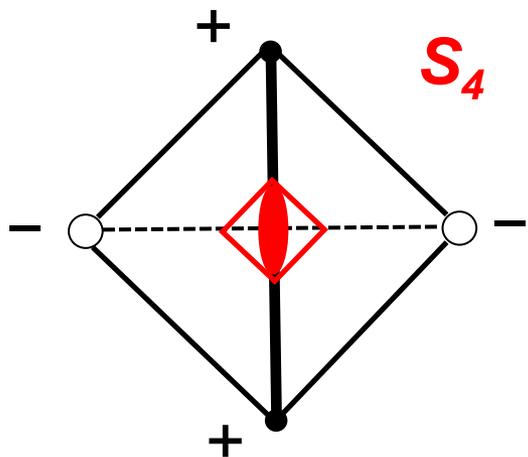
**Закрытые преобразования симметрии
оставляют на месте хотя бы одну точку фигуры
(отсюда точечные группы)**

Два вида закрытых преобразований симметрии

**1. Собственные вращения: повороты фигуры
как единого целого**

**2. Несобственные вращения: перестановка
одинаковых частей фигуры (отражение,
инверсия и их комбинации с поворотами)**

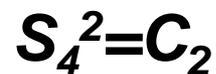
Несобственное вращение тетраэдра: поворот с отражением на 90°



катион тетраэтиламмония



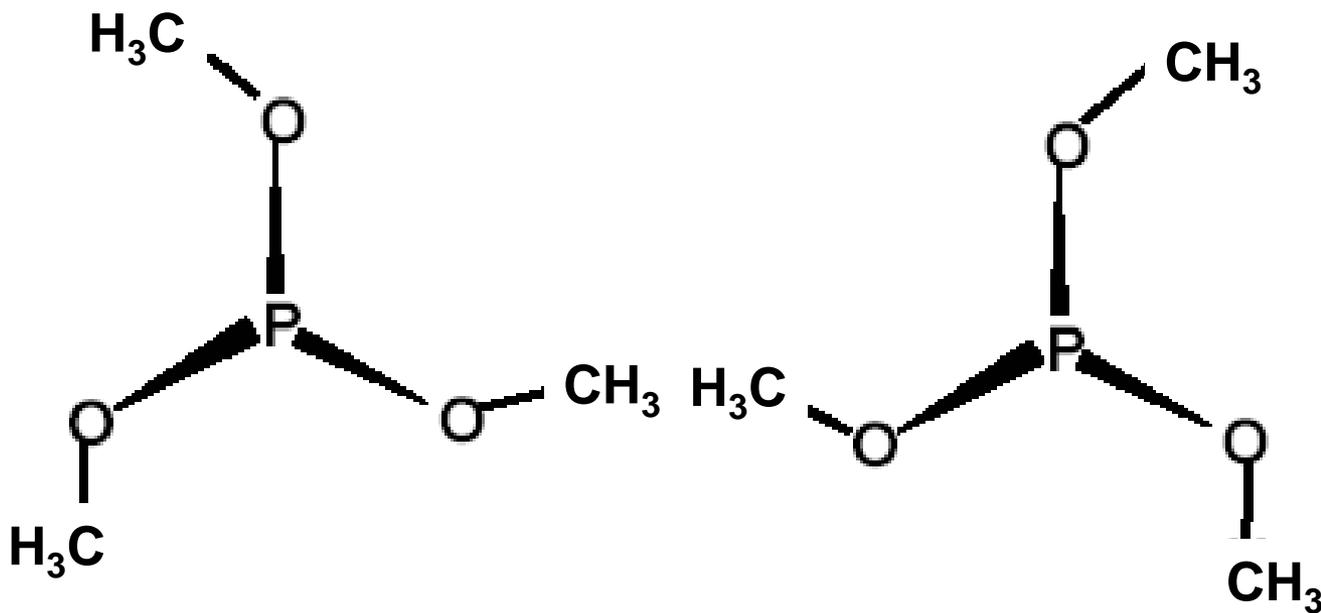
группа S_4 : $\{e, S_4^1, S_4^2, S_4^3\}$



Трёхмерная фигура (конечная или бесконечная),
в группе которой нет несобственных вращений,
называется **ХИРАЛЬНОЙ**

У каждой хиральной фигуры есть **две** формы
(«**левая**» и «**правая**»), которые нельзя совместить
в трёхмерном пространстве

пример: молекула $P(OCH_3)_3$, группа $C_3 = \{C_3^1, C_3^2, e\}$



Обозначения элементов симметрии и точечных групп

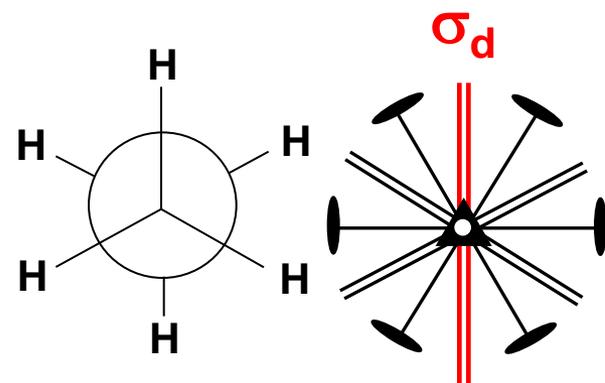
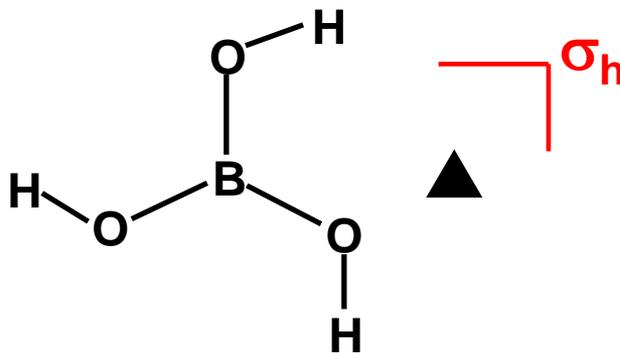
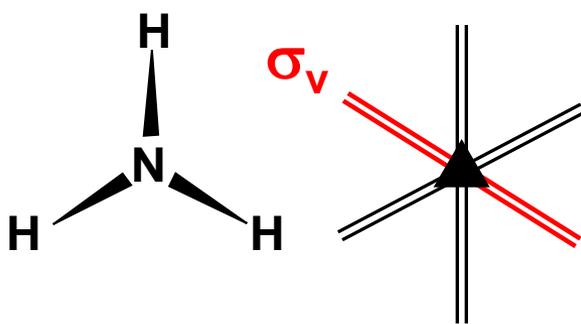


Артур Шёнфлис (Arthur Schönflies), 1853 – 1928

Немецкий математик, ученик Вейерштрасса и Клейна, работал в областях кинематики, геометрии, топологии, кристаллографии. В 1888-1891 параллельно с Е.С.Федоровым вывел 230 пространственных групп. Символы кристаллографических классов «по Шёнфлису» стали основной системой обозначения точечных групп в физике, химии и спектроскопии

элементы симметрии по Шёнфлису

1. Поворотные оси: C_n , повороты на $(2\pi/n)k$: C_n^k
2. Зеркально-поворотные оси: S_n , повороты с отражением S_n^k
В частности, $S_1 = \sigma$ (отражение), $S_2 = i$ (инверсия)
3. По расположению к осям C_n различают «вертикальные» σ_v , «горизонтальные» σ_h и «диагональные» σ_d плоскости



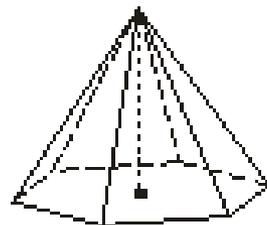
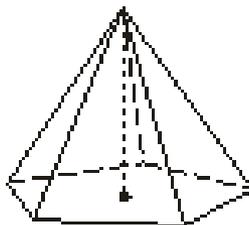
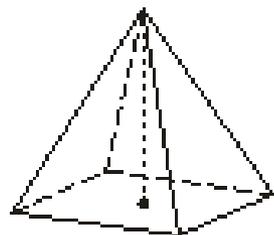
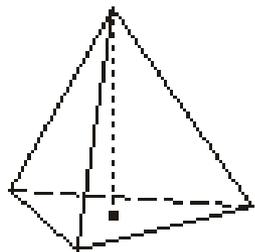
Семейства точечных групп по Шёнфлису

C_n : цилиндрические, D_n – диэдрические ($C_n + nC_2^\perp$).
 n – порядок главной ПОВОРОТНОЙ оси

C_2 C_3 C_4 ... семейство C_n
 H_2O_2 $P(OR)_3$...

$S_2(=C_i)$ S_4 S_6 ... семейство S_n
 мезо- CHF_2-CHF_2 NEt_4^+ ...

C_{2h} C_{3h} C_{4h} ... семейство C_{nh}
 план. H_2O_2 $B(OH)_3$...

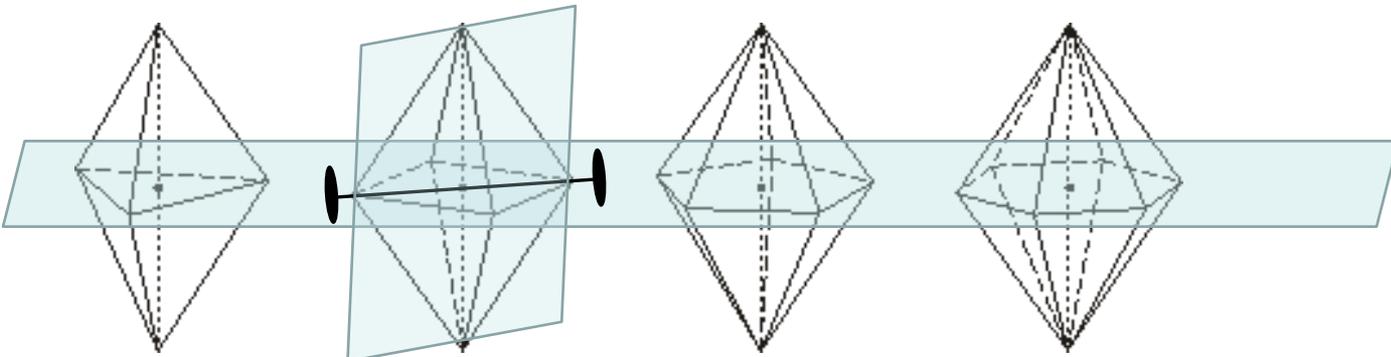


пирамиды

C_{2v} C_{3v} C_{4v} C_{5v} C_{6v} ... семейство C_{nv}

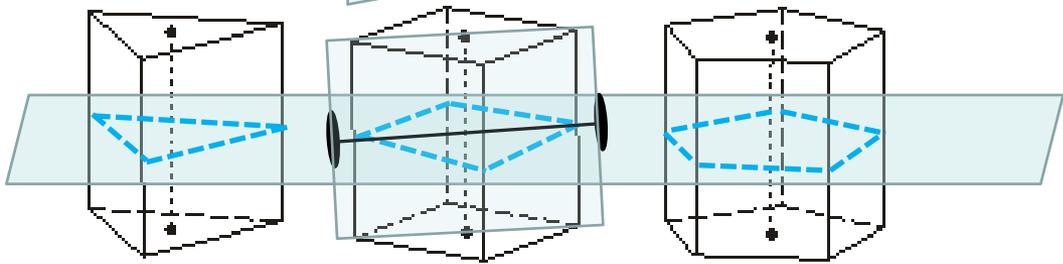
D_2 D_3 D_4 D_5 ... семейство $D_n: C_n + nC_2^\perp$

бипирамиды



σ_h

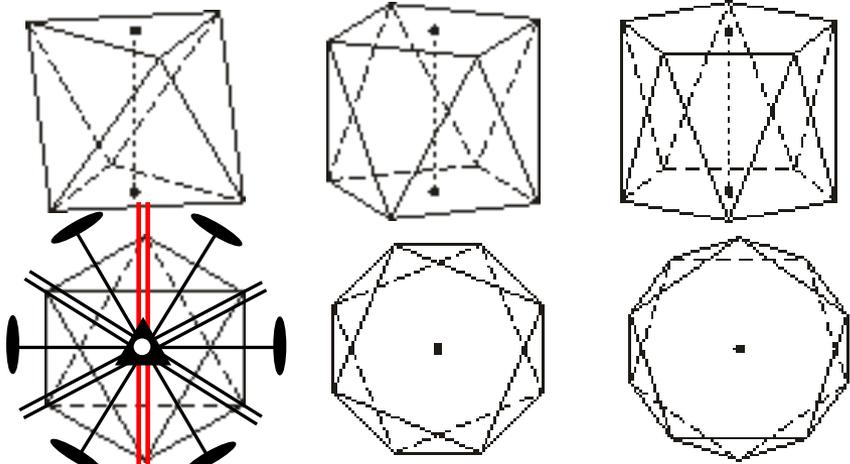
призмы



σ_h

D_{2h} D_{3h} D_{4h} D_{5h} ... семейство D_{nh}

антипризмы



D_{3d}

D_{4d}

D_{5d}

...

семейство D_{nd}

Категории симметрии

1. Низшая категория: нет осей порядка выше 2.

Возможные элементы: C_2 , $\sigma=S_1$, $i=S_2$ ($e=C_1$)

7 групп: (C_1) C_2 , C_s , C_i , C_{2h} , C_{2v} , D_2 , D_{2h}

2. Средняя категория: ОДНА (и только одна)

ось C_n или S_n порядка $n > 2$

7 семейств: C_n , S_n ($n=2k$), C_{nh} , C_{nv} , D_n , D_{nd} , D_{nh}

3. Высшая категория: БОЛЬШЕ ОДНОЙ оси

C_n или S_n порядка $n > 2$.

7 групп: T , T_h , T_d , O , O_h , I , I_h

7 + 7 + 7

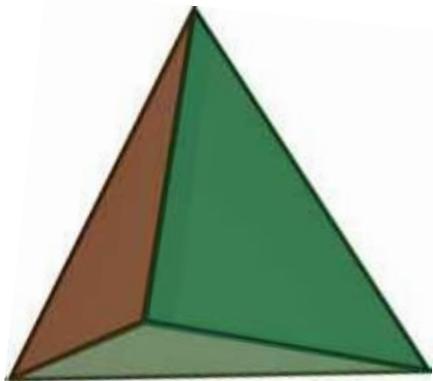
7 групп высшей категории: 3 семейства

Семейство тетраэдра: T, T_h, T_d

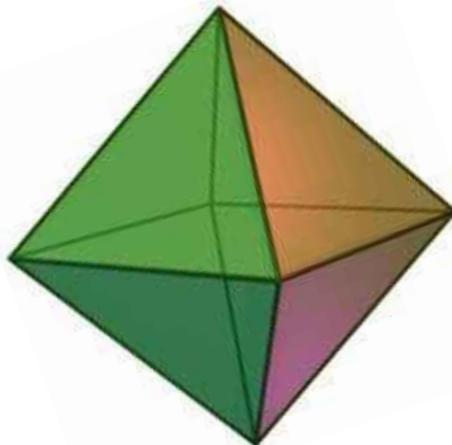
Семейство октаэдра: O, O_h

Семейство икосаэдра: I, I_h

Правильные полиэдры (платоновы тела)

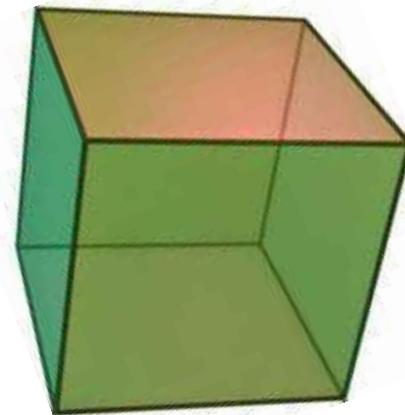


тетраэдр T_d

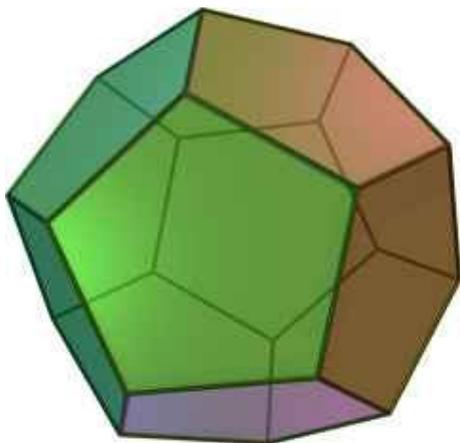


октаэдр

O_h

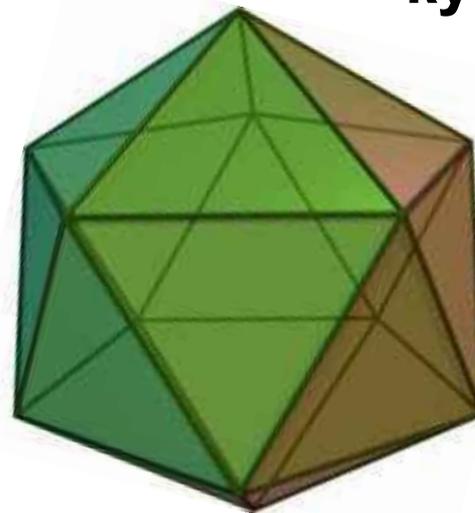


куб



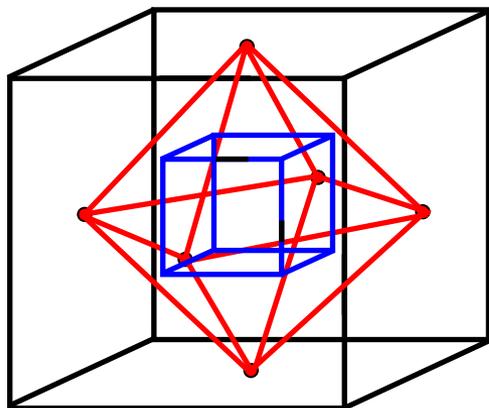
пентагон-додекаэдр

I_h



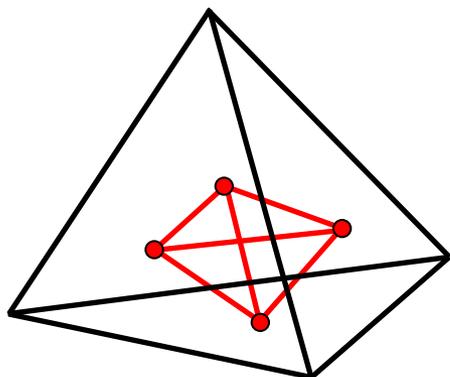
икосаэдр

Дуальные полиэдры



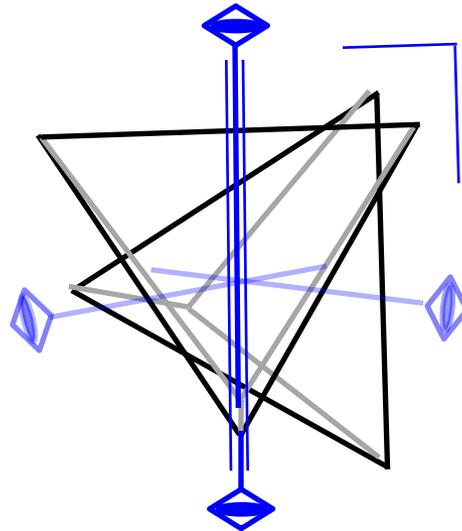
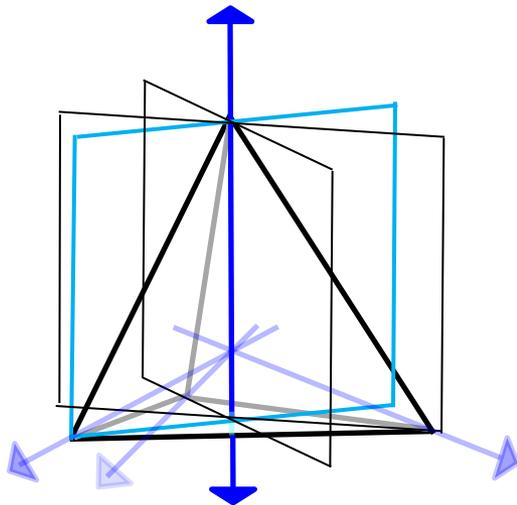
I. куб (гексаэдр) и октаэдр,
точечная группа O_h

II. Пентагондодекаэдр и икосаэдр,
точечная группа I_h



III. Тетраэдр дуален сам себе,
точечная группа T_d

Семейство тетраэдра



T_d (симметрия тетраэдра): четыре оси C_3 , три оси $S_4 \supset C_2$, шесть плоскостей σ_d ; **НЕТ ЦЕНТРА i** , порядок = 24

T (все повороты тетраэдра): четыре оси C_3 , три оси C_2 , порядок = 12, **хиральные фигуры**

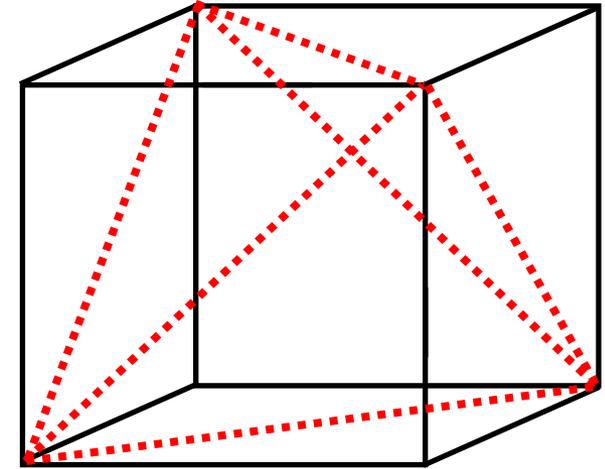
T_h : операции группы T + **центр инверсии i**
порядок = 24

$$T \subset T_d \text{ и } T \subset T_h$$
$$T_d \cap T_h = T$$

Семейство октаэдра

O_h : симметрия куба и октаэдра
три оси C_4 , четыре оси C_3 (S_6),
шесть осей C_2 , девять плоскостей σ ,
центр инверсии i ; порядок = 48

O : повороты куба и октаэдра
порядок = 24, хиральные фигуры,
 $O_h \supset O$, $O \approx T_d$ (изоморфны)



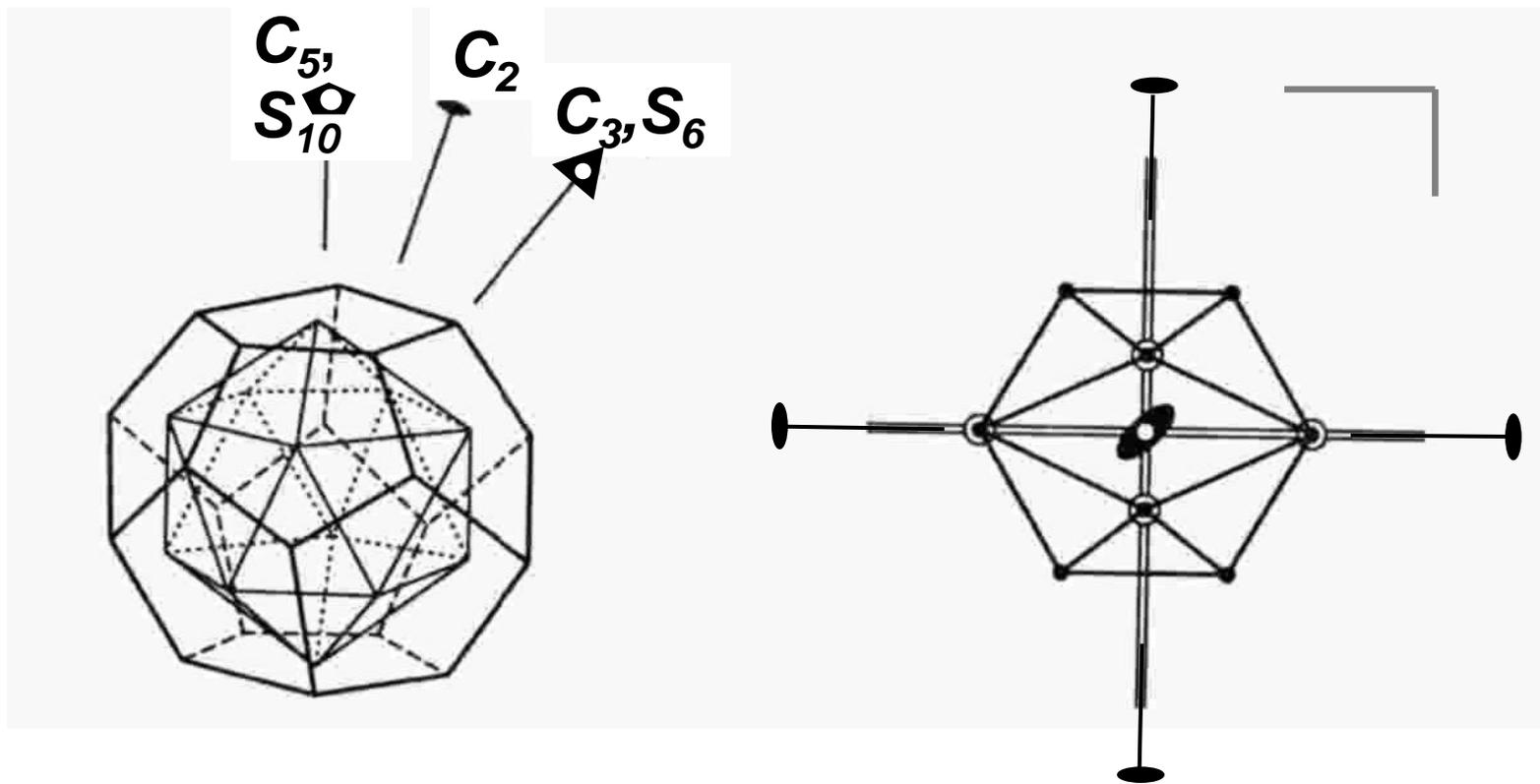
$O_h \supset T_d$

Семейство икосаэдра

I_h : симметрия икосаэдра и пентагондодекаэдра
шесть осей C_5 (S_{10}), 10 осей C_3 (S_6), 15 осей C_2 ,
15 плоскостей σ , центр инверсии i ; порядок = 120

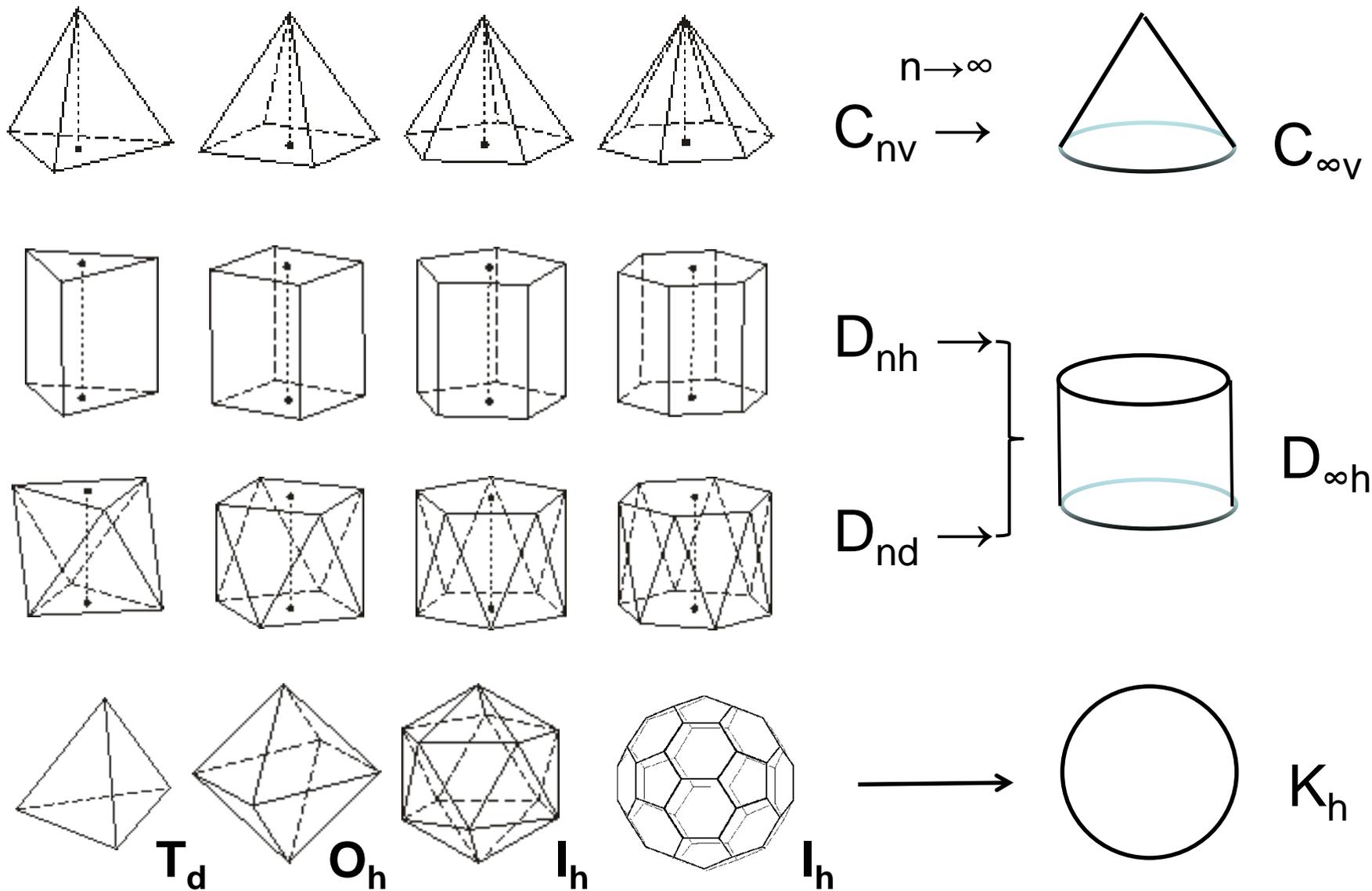
I : повороты икосаэдра и пентагондодекаэдра
порядок = 60, хиральные фигуры, $I_h \supset I$

Элементы симметрии группы I_h



координатные оси $C_2^{(x,y,z)}$

«Пределы» в рядах полиэдров



Точечные группы бесконечного порядка

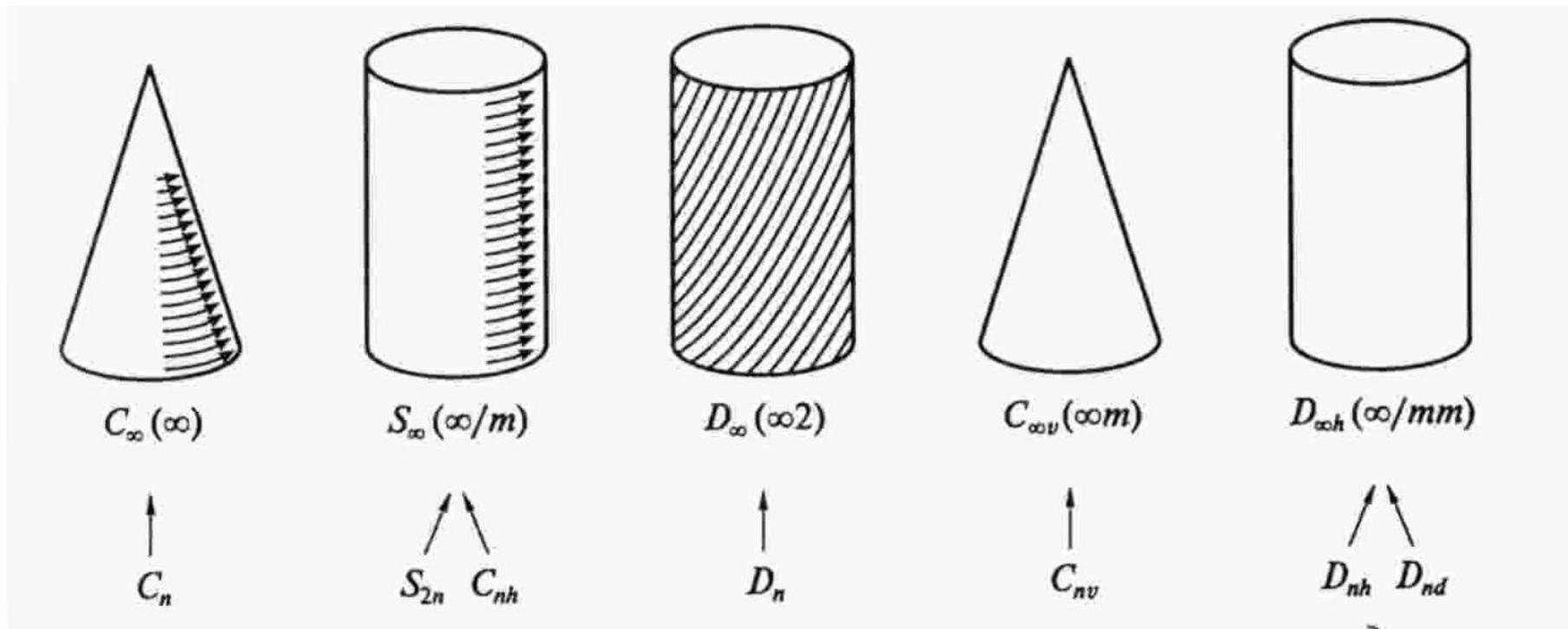


В этих **СЕМИ** группах имеется бесконечное множество поворотов на любой угол ϕ вокруг единственной оси C_{∞} (семейство цилиндра) или бесконечного множества осей C_{∞} , проходящих через одну точку (семейство сферы) Сфера – конечная трехмерная фигура высшей симметрии (группа K_h); все точечные группы – подгруппы K_h .

Точечные группы бесконечного порядка также называются **предельными группами**, или **группами Кюри**.

Аксиальная $C_{\infty v}$ -симметрия: гетероатомные **линейные молекулы** CO, HCl, HCN, **электрич. диполь**, **плоская волна**
Цилиндрическая $D_{\infty h}$ -симметрия: молекулы O₂, C₂H₂ и т.д.
Сферическая K_h -симметрия: **изолированный атом**, **поле ядра**.

Предельные точечные группы (группы Кюри): цилиндрическая симметрия



C_∞ – «вращающийся конус» (= конус без плоскостей σ_v)

т.е. группа всех поворотов вокруг единственной оси (конуса)

$S_\infty = C_{\infty h}$ – «вращающийся цилиндр» (= без пл-стей σ_v и осей C_2)

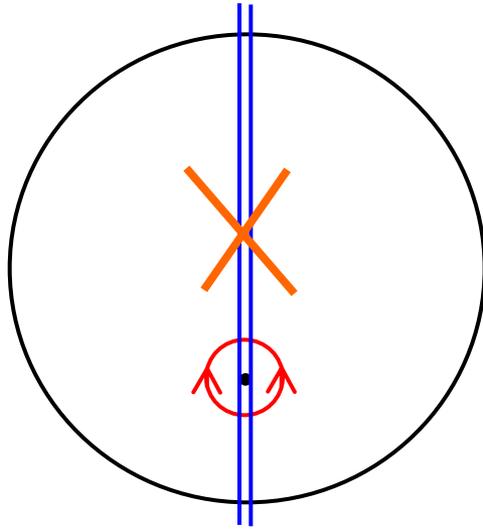
D_∞ – «скрученный цилиндр» (нет σ_h и σ_v , есть оси C_2),

т.е. группа всех поворотов цилиндра

$C_{\infty v}$ – неподвижный конус

$D_{\infty h}$ – неподвижный цилиндр

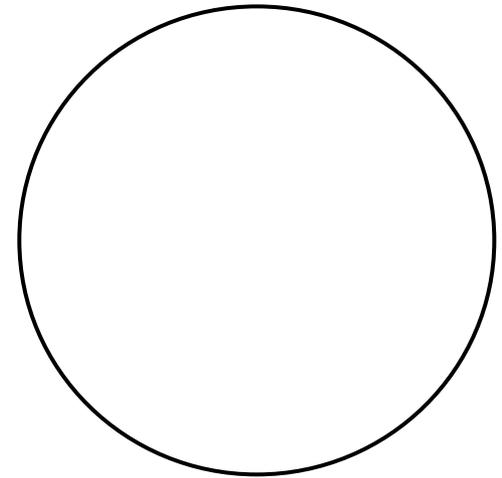
Предельные точечные группы (группы Кюри): сферическая симметрия



K

группа всех поворотов сферы
(бесконечное число осей C_{∞})

«сфера с вращающимися точками»
(= без плоскостей m)



$K_h = K \times C_i$

неподвижная сфера

Все точечные группы (по Шёнфлису)

1. **Низшая** категория: нет осей порядка выше 2.

Возможные элементы: C_2 , $\sigma=S_1$, $i=S_2$ ($e=C_1$)

7 групп: (C_1) C_2 , C_s , C_i , C_{2h} , C_{2v} , D_2 , D_{2h}

2. **Средняя** категория: ОДНА (и только одна)

ось C_n или S_n порядка $n > 2$

7 семейств: C_n , S_n ($n=2k$), C_{nh} , C_{nv} , D_n , D_{nd} , D_{nh}

3. **Высшая** категория: БОЛЬШЕ ОДНОЙ оси

C_n или S_n порядка $n > 2$.

7 групп: T , T_h , T_d , O , O_h , I , I_h

4. **Предельные** точечные группы бесконечного порядка

7 групп: C_∞ , $S_\infty (=C_{\infty h})$, $C_{\infty v}$, D_∞ , $D_{\infty h} (=D_{\infty d})$, K , K_h

7 + 7 + 7 + 7

Основная литература по симметрии в кристаллографии:

**П.М.Зоркий, «Симметрия молекул
и кристаллических структур», МГУ, 1986**

или

**П.М.Зоркий, Н.Н.Афоница,
«Симметрия молекул и кристаллов», МГУ, 1979;**

**П.М.Зоркий, «Задачник по кристаллохимии
и кристаллографии», МГУ, 1981**

**Ю.Л.Словохотов, «Материалы по курсу кристаллохимии»,
ч.ч. 1 и 2 (на сайте лаборатории)**

Вводная литература:

**Ф.Коттон, Дж.Уилкинсон,
«Современная неорганическая химия» (Мир, 1969),
т.1, гл. 4, разд. 4.7 («Молекулярная симметрия»): стр. 139-146
(pdf на сайте лаб. кристаллохимии)**