ФИЗИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

Кириченко Валерий Григорьевич
К.123, тел.335-37-55

E-mail:val_kir48@mail.ru
Skype: Kirichenko Valery

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,
Физико-технический факультет
Кафедра материалов реакторостроения

2012

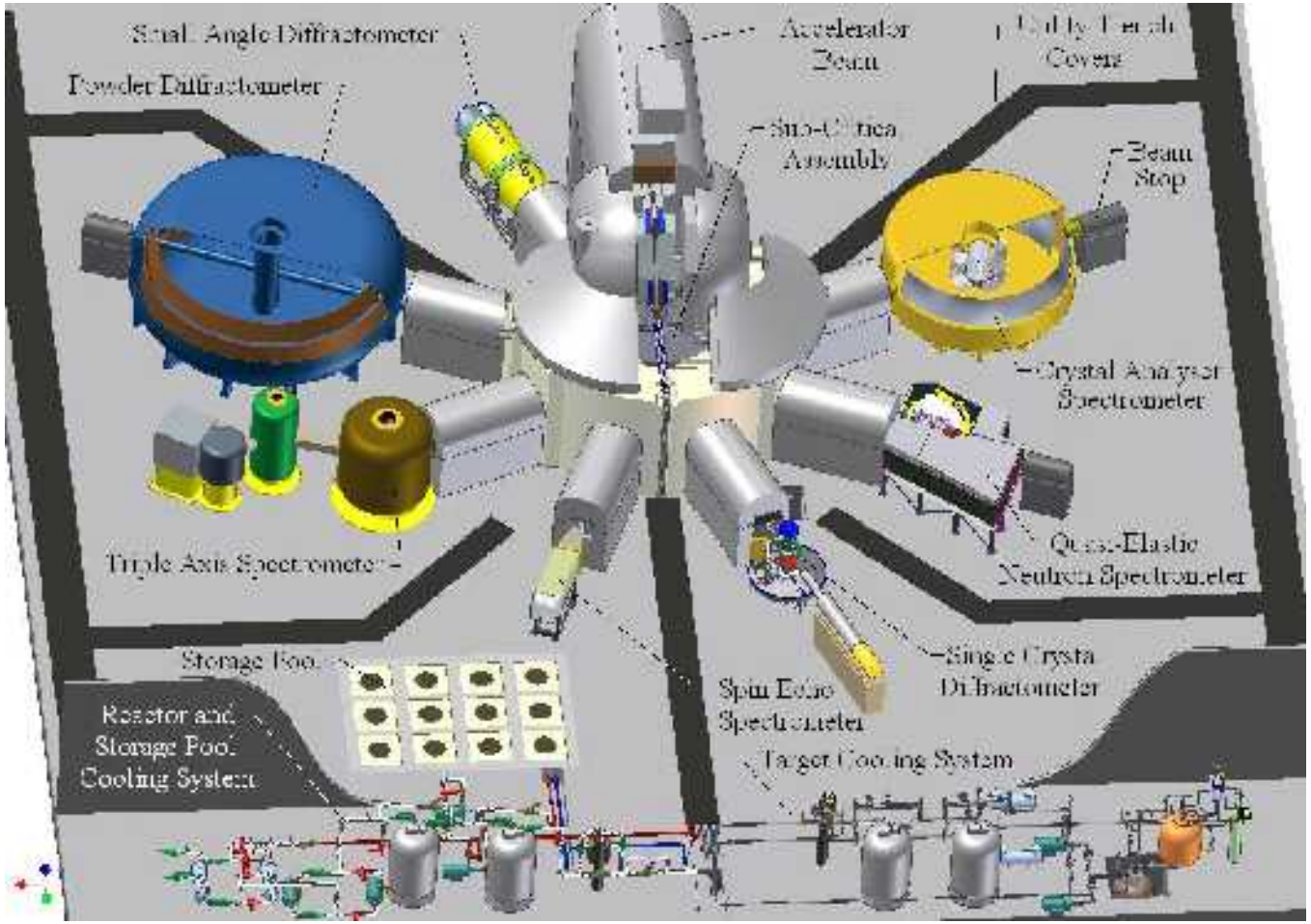
Поздравляю Вас с выбором кафедры – материалов реакторостроения! Важно помнить это еще 3 года и не прилагать сверхусилия для ухода из университета.

- **Важные даты:**
- Август, 15, 2012 – ознакомительная практика
- Сентябрь, 2012 – распределение по специализациям, выбор тем и руководителей бакалаврских работ
- Июнь , 25, 2013 – защита бакалаврских работ
- Июль, 2013 – поступление в магистратуру по рейтингу
- Май, 2014 – ноябрь, 2014; - преддипломная практика
- Декабрь, 2014 – февраль, 2015; - написание диплома
- Февраль, 23, 2015 – защита магистерского диплома

Что же делать Вам тогда, чем заниматься?

- ХНУ и другие университеты – аспирантура
- ХФТИ, Монокристаллы, ФТИНТ – работа, аспирантура
- ЗАЭС, ЮУАЭС, ХАЭС, РАЭС, Чернобыль…
- Россия – Москва, ИАЭ, Обнинск, ФЭИ, Волгодонск, НИИАР
- Германия, Нидерланды, Франция, в меньшей степени Англия, Италия
- США, Канада

НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК В ННЦ «ХФТИ», ОСНОВАННЫЙ НА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ, УПРАВЛЯЕМОЙ УСКОРИТЕЛЕМ

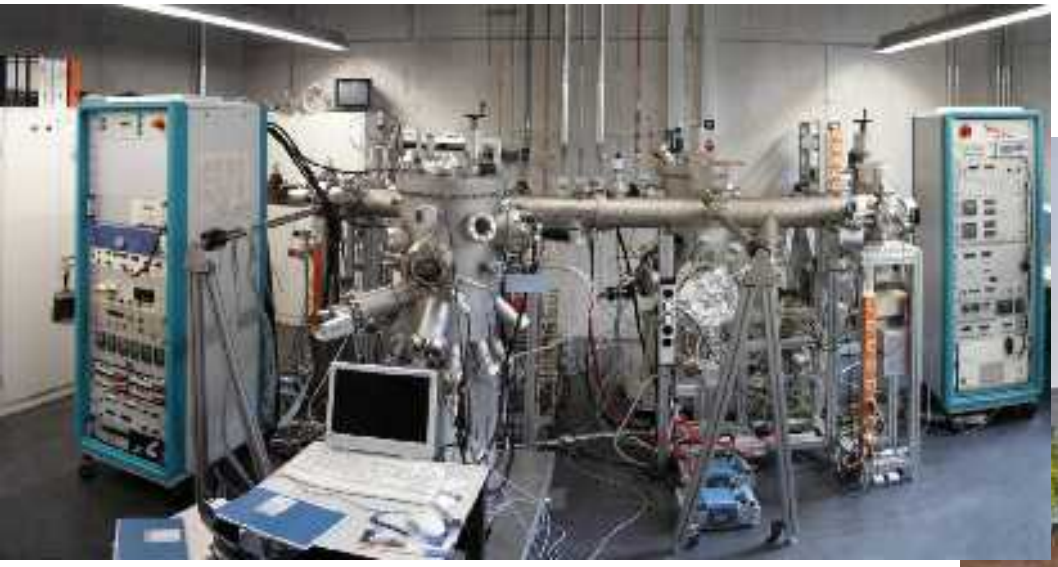


Общий вид подкритической сборки управляемой линейным ускорителем с размещенными нейтронными каналами

ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ

- Список нейтронных экспериментальных каналов:
- ГЭК -1 Медицина
- ГЭК -2 Элементный состав вещества
- ГЭК -3 Нейтронография
- ГЭК -4 Физика конденсированного состояния вещества
- ГЭК -5 Малоугловое рассеяние нейтронов
- ГЭК -6 Структурные исследования
- ГЭК -7 Ядерная физика
- ВЭК -1 Производство изотопов
- ВЭК -2 Радиационное материаловедение
- ВЭК -3 Исследования трансмутации актиноидов

XFORD



Предмет кристаллографии

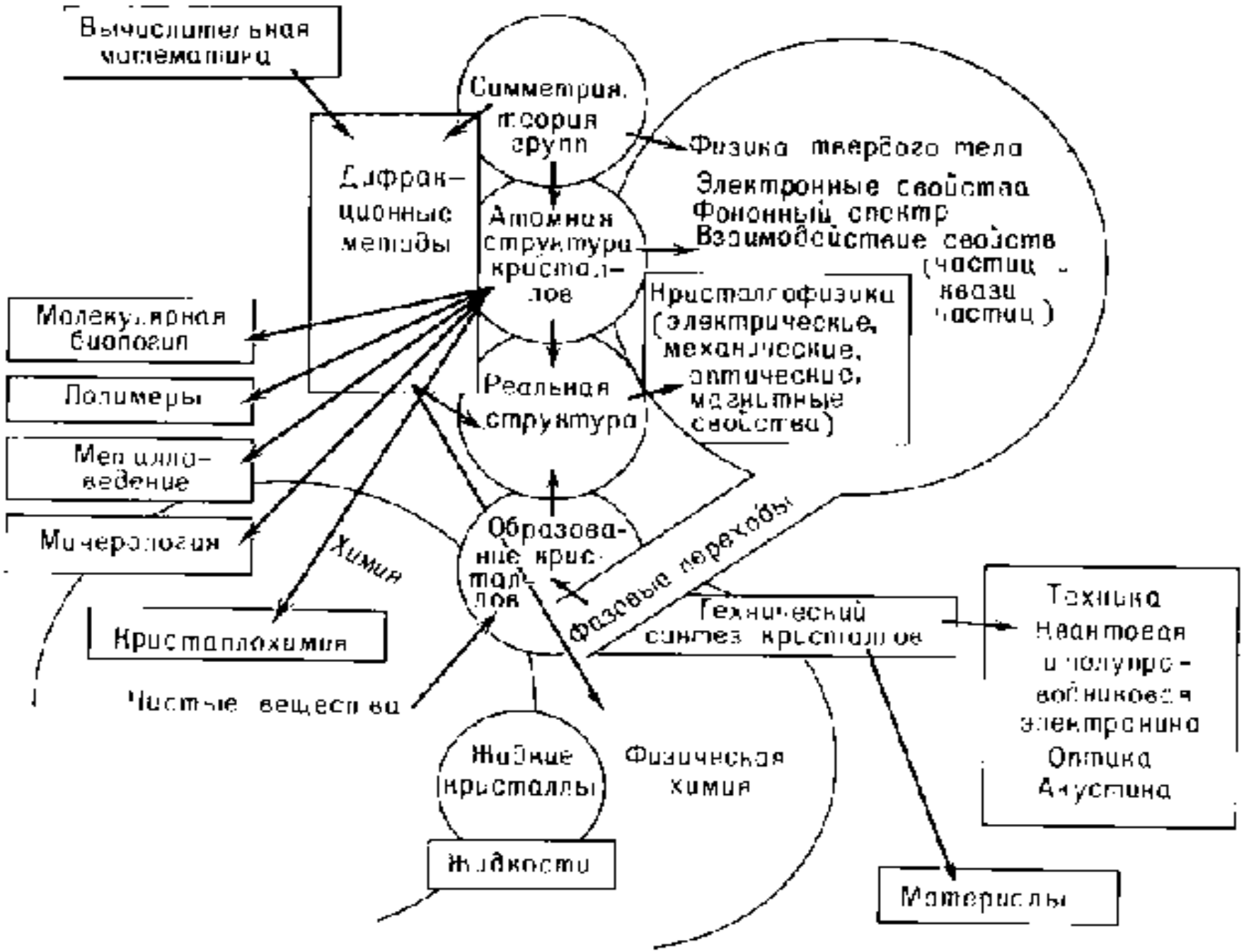
- Кристаллы, от греческого krystallos - лед, - это твердые тела, обладающие трехмерной, периодической, атомной структурой, и при равновесных условиях образования или роста имеющие форму правильных симметричных многогранников.
- **КРИСТАЛЛОГРАФИЯ** - наука об атомно-молекулярном строении, симметрии, физических свойствах, образовании и росте кристаллов. В задачи кристаллографии входит описание и понимание структуры и свойств конденсированных состояний вещества и их связи с пространственными соотношениями атомов и межатомных сил.
- Совокупность методов описания кристаллов и закономерности их огранки оставляют содержание **геометрической кристаллографии**. На основе геометрической кристаллографии возникла гипотеза об упорядоченном трехмерно - периодическом расположении в кристаллах его составных частиц, в современном понимании - атомов, молекул, которые образуют кристаллическую решетку.

- В **структурной кристаллографии** исследуется атомно-молекулярное строение кристаллов методами рентгеноструктурного анализа, электронографии, нейтронографии, опирающиеся на дифракцию волн и частиц в кристаллах. Применяются также методы оптической спектроскопии, электронной микроскопии, сканирующей туннельной микроскопии и др. В результате определена кристаллическая структура более 100000 химических веществ.
- Изучение механических, оптических, электрических, магнитных свойств кристаллов является предметом изучения **кристаллофизики**, которая соединяет кристаллографию с физикой твердого тела.
- **Кристаллохимия** - раздел кристаллографии, в котором изучаются закономерности расположения атомов в кристаллах и природа химической связи между ними. Кристаллохимия основана на обобщении результатов экспериментального рентгенографического и дифракционного анализа атомной структуры кристаллов, на классических и квантовых теориях химической связи, на расчетах энергии кристаллических структур с учетом симметрии кристаллов. Закономерности кристаллохимии позволяют предсказать, исходя из химического состава вещества,- расположение атомов или молекул в кристаллической структуре и расстояние между ними.\

- Закономерности кристаллохимии позволяют предсказать, исходя из химического состава вещества,- расположение атомов или молекул в кристаллической структуре и расстояние между ними. Полное описание атомной структуры кристалла включает определение:
- 1) Размеров элементарной ячейки;
- 2) Пространственной группы симметрии кристалла;
- 3)Координат атомов; 4) Расстояний между атомами;
- 5) Типа химической связи;
- 6) окружения атомов; 7) характерных атомных группировок;
- 8) Тепловых колебаний атомов.

Лазури́т (ля́пис-лазу́рь) — **$(Na,Ca)_8(AlSiO_4)_6(SO_4,S,Cl)_2$**

кристаллы витерита $BaCO_3$


Вычислительная математика
Симметрия, теория групп
Физика твердого тела
Электронные свойства
Фононный спектр
Взаимодействие свойств (частиц и квазичастиц)
Дифракционные методы
Атомная структура кристаллов
Кристаллофизика (электрические, механические, оптические, магнитные свойства)
Молекулярная биология
Полимеры
Металловедение
Минералогия
Реальная структура
Химия
Образование кристаллов
Фазовые переходы
Технический синтез кристаллов
Техника
Квантовая и полупроводниковая электроника
Оптика
Акустика
Кристаллохимия
Чистые вещества
Жидкие кристаллы
Физическая химия
Жидкости
Материалы

Современная периодическая система элементов Д.И.Менделеева

Атомная масса, относительная — Atomic mass, relative
Атомный номер. Обозначение — Atomic No. Symbol
Распределение электронов — Electron configuration
Температура плавления (°C) — Melting point (°C)
Температура кипения (°C) — Boiling point (°C)
Электроотрицательность (по Полингу/по Оллреду и Рохову) — Electronegativity (Pauling/Allred & Rochow)
Название — Name
Латинское название — Latin name

1	1 H																2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub	113 Uut	114 Uuq				

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

© Р.С.Сайфуллин, А.Р.Сайфуллин 2004
© R.S.Saifullin, A.R.Saifullin 2004

* Elements no stable nuclides. For radioactive elements the value in parentheses refers to the number of nucleons (mass number) of the most stable isotope (IUPAC, 1995)
* Элементы не имеют устойчивых нуклидов. Для них в скобках приведено значение массового числа (числа нуклонов в ядре) наиболее долгоживущего изотопа (IUPAC, 1995)
[ ] Alternative english name
[ ] American spelling of the element's name
[ ] Альтернативное английское название
[ ] Американское написание названия элемента

Типы связи

- Кристаллы 5 типов химической связи 1) Ионные, 2)Ковалентные, 3)Металлические, 4)Молекулярные, 5)водородные

1. В **ионных** кристаллах внешние валентные электроны переходят от атомов металла, которые становятся положительно заряженными катионами, к атомам неметаллов, отрицательно заряженным анионам. Это приводит к электростатическому взаимодействию между ними. При этом у ионов заполнены s - оболочки. Взаимодействие ионов является кулоновским:

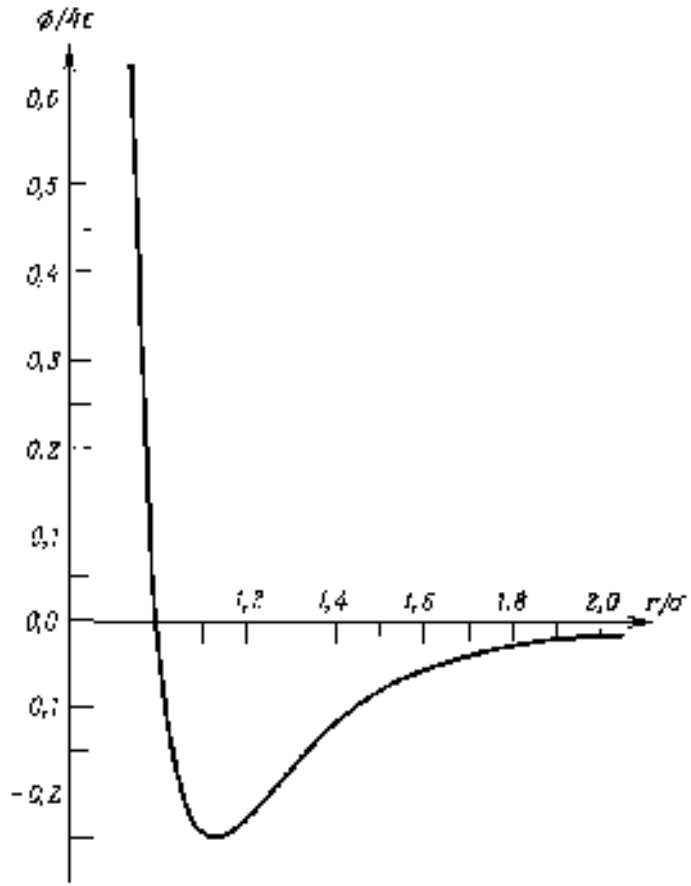
$$U_{ион}(r) = - Z_1' Z_2' e^2 r^{-1} = b r^{-n}, \qquad (1)$$

где r - расстояние между центрами ионов, **в** и n - параметры, которые могут быть найдены из сжимаемости кристаллов (n - 6-9), Z_1' и Z_2' - эффективные заряды ионов (в Na Cl $Z_1' = +0,8e$, $Z_2' = -0,8e$). В межатомном пространстве электронная плотность $\rho(r)$ близка к нулю.

- 2. В случае **ковалентной** связи пары валентных электронов соседних атомов обобществляются, образуя своеобразные "мостики" электронной плотности между связанными атомами. Силы взаимодействия между атомами являются направленными и имеют квантово - механическую природу (обменное взаимодействие). Потенциальная энергия взаимодействия феноменологически равна:
- **$U(r) = a\ r^{-m} = c \exp(-\alpha r)$**, (2)
- где $m = 4$, α, c – константы.

3. Природа **металлической** связи та же, что и ковалентной. Происходит обобществление внешних электронов (валентных), однако характер локализации этих электронов иной, - они приблизительно равномерно заполняют все межатомное пространство, образуя общий электронный газ, который и осуществляет коллективное взаимодействие с положительно заряженными ионными остовами атомов металлов. Расстояния между атомами для 3-х основных типов связи в кристаллах составляют 0,15-0,25 нм.

- 4. В **молекулярных** кристаллах атомы внутри молекул объединены прочными ковалентными связями, а атомы соседних молекул взаимодействуют за счет более слабых ван дер - Ваальсовых сил, имеющих дипольное происхождение.
- Кристаллы с водородной связью - лед
- Каждому кристаллическому веществу присуща определенная кристаллическая структура. Образование той или иной кристаллической структуры определяется общим принципом термодинамики: наиболее устойчива структура, которая при данном давлении и данной температуре T имеет минимальную свободную энергию **F = U -TS**, где -U- энергия связи кристалла (энергия, необходимая для разъединения кристалла на отдельные атомы или молекулы) при T= 0 К, S -энтропия. Свободная энергия тем выше, чем сильнее связь в кристаллах. Она составляет 400 – 80 кДж/моль для кристаллов с ковалентной связью, несколько меньше у ионных и металлических кристаллов и наиболее низка для молекулярных кристаллов – 4-40 кДж/моль. Теоретическое определение свободной энергии и предсказание структуры пока возможны лишь для сравнительно простых случаев.



20.1. Потенциал «6—12» Леннарда-Джонса [формула

lever unaffected by the feedback loop. For the apparatus used here the d.c. gain of the open loop is 150, and it has a single, dominant pole at 1 Hz. Unity gain is thus at 150 Hz. The modulation frequency used is 2.3 kHz, so the feedback loop will only reduce the modulated amplitude by 6%. As the lever first resonance is at 10.3 kHz, and has fairly high Q, we conclude that measurements at 2.3 kHz give the d.c. open-loop lever stiffness while retaining the stiffness amplifying effect of the feedback loop at lower frequencies. (The process is in this respect not unlike obtaining tunnelling barriers in STM by tunnel gap modulation at higher frequencies.) The rate of tip–sample approach is 7 Å s^{-1} with a step size of 0.35 Å, designed to be significantly slower than the response time of the feedback circuit.

We use a modified Omicron ultrahigh vacuum (UHV) AFM, which is part of a comprehensive UHV system with a variety of surface analytical techniques; further details are given elsewhere[8]. The tip is silicon, on a silicon cantilever, and the sample is Si(111) prepared by standard procedures in the same apparatus. The free lever stiffness is 0.24 N m^{-1} (for the data reported here), which is subtracted from the overall stiffness measured by modulation to give the net tip–sample interaction stiffness. Note that the has suddenly risen to a very large positive value, over 10 N m^{-1}, implying a significant area of contact. The sample approach ramp is stopped as soon as this change in contact stiffness is observed. When the sample is then retracted, the contact stiffness remains large, until a sudden pull-off occurs, at a tensile force of several nanonewtons. The whole cycle involves considerable hysteresis, possibly some plasticity, and closely resembles both experimental observations of adhesion in UHV[9,10], and molecular-dynamics simulations[11,12].

The introduction of the force feedback loop brings a dramatic change in behaviour. Figure 2 shows a complete approach and separation cycle when the force feedback loop is active. Only moderate variations of lever modulation amplitude occur, and we plot the actual interaction stiffness variation, that is, overall stiffness minus lever stiffness. Some features are immediately apparent. First, and in striking contrast to Fig. 1, the behaviour is quite reversible. There is essentially no hysteresis between approach and retraction, even though we are exploring interactions very much stronger than those which cause snap-in when there is no feedback. (What little hysteresis is visible is almost certainly due to thermal drift and creep of the piezo material

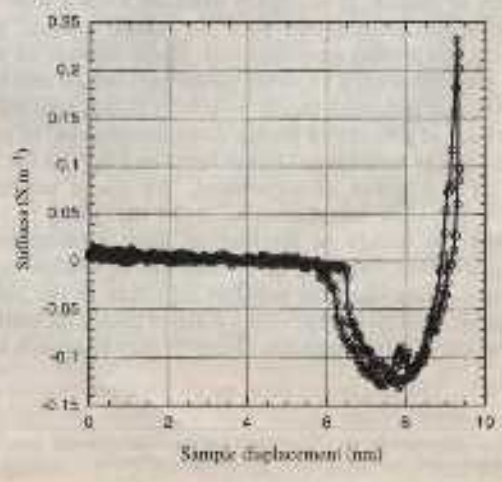
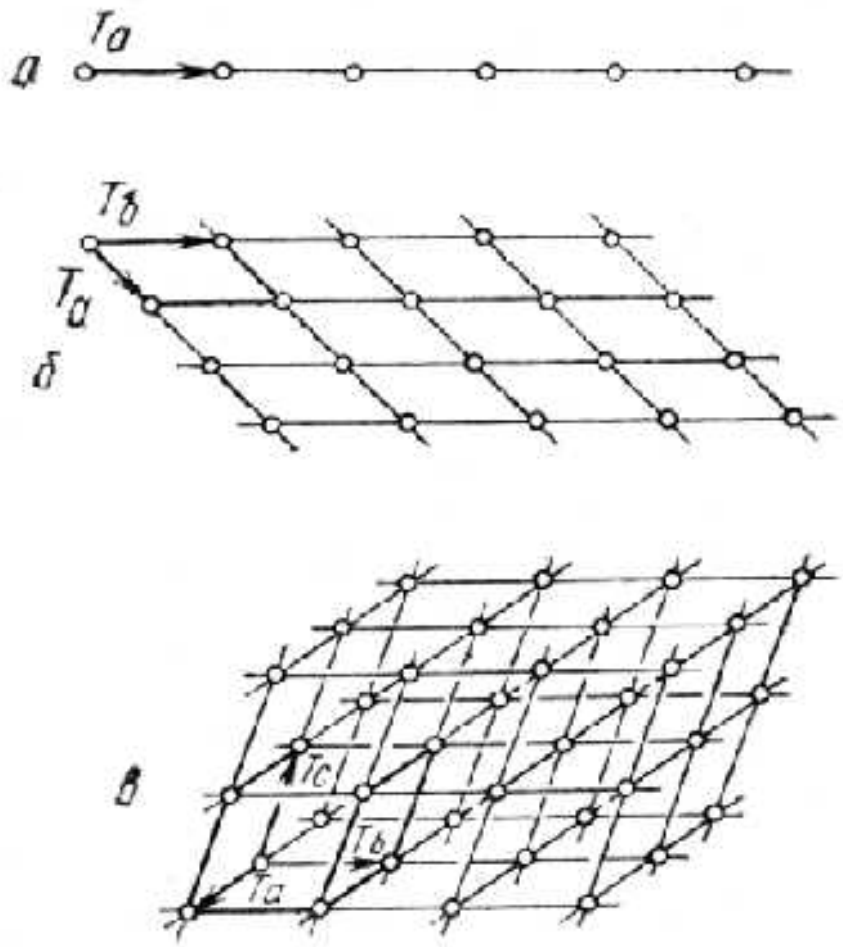


FIG. 2 Behaviour of the AFM with feedback control. The lever position is held at a fixed point by applying a force to the tip. Measured stiffness of interaction during approach and retraction of the sample is now smooth and reversible, in contrast to Fig. 1.

Кристаллические структуры



Узловой ряд (а), узловая сетка (б), пространственная решетка (в). *T* - трансляция

Кристаллические решетки.

- Истинным критерием кристалличности кристаллической структуры служит не специфическая форма большого образца, (в виде крупного многогранника), а периодичность расположения его ионов на микроскопическом уровне.
- Рассматриваем идеальные кристаллы. Идеальный кристалл – это результат построения путем бесконечного числа повторений в трехмерном пространстве одного и того же структурного элемента.
- Или другими словами, идеальный кристалл - это физическое тело, состоящее из атомов, расположенных в пространственной решетке так, что можно ввести три вектора элементарных трансляций обладающих следующими свойствами.
- при рассмотрении этой атомной решетки из произвольной точки **R** решетка имеет тот же вид, что и при рассмотрении из точки **R'**:

$$\vec{r}' = \vec{r} + n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c}$$ где n_1, n_2, n_3 – целые числа.

- Векторы элементарных трансляций называют основными, если две любые точки **r** и **r'** всегда удовлетворяют этому соотношению при любом наборе $\mathbf{n_1}$, $\mathbf{n_2}$, $\mathbf{n_3}$.
- Основные векторы $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ часто выбирают в качестве ортов системы координат, связанной с кристаллографическими осями.
- Операцию перемещения кристалла как целого параллельно самому себе, описываемую вектором $\vec{T} = n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c}$, называют трансляцией.

Решетки Браве.

- Такое описание кристалла использует фундаментальное понятие **решетка Браве** 1845)г. Решетка Браве характеризует периодическую структуру, образуемую повторяющимися элементами кристалла. Эти элементы могут представлять отдельные атомы, группы атомов, молекулы, ионы. Однако в понятии решетки Браве находит свое отражение только геометрия расположения элементов в пространстве. Дадим 2 эквивалентных определения решеток Браве.
- 1. Решетка Браве – это бесконечная периодическая структура, образованная дискретными точками и имеющая абсолютно одинаковый пространственный порядок и ориентацию независимо от того какую ее точку мы примем за исходную.
- 2. Трехмерная решетка Браве образована всеми точками с векторами **R** вида

$$\mathbf{R} = n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3$$ -где $a_1\ a_2\ a_3$

- –
- любые три вектора не лежащие в одной плоскости,

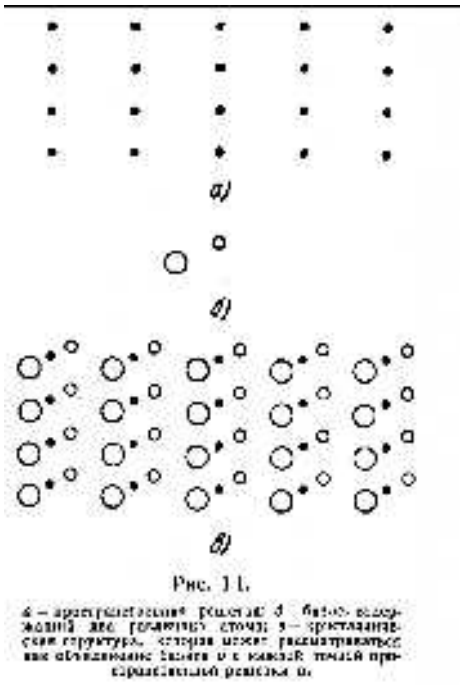
$n_1,\ n_2,\ n_3$

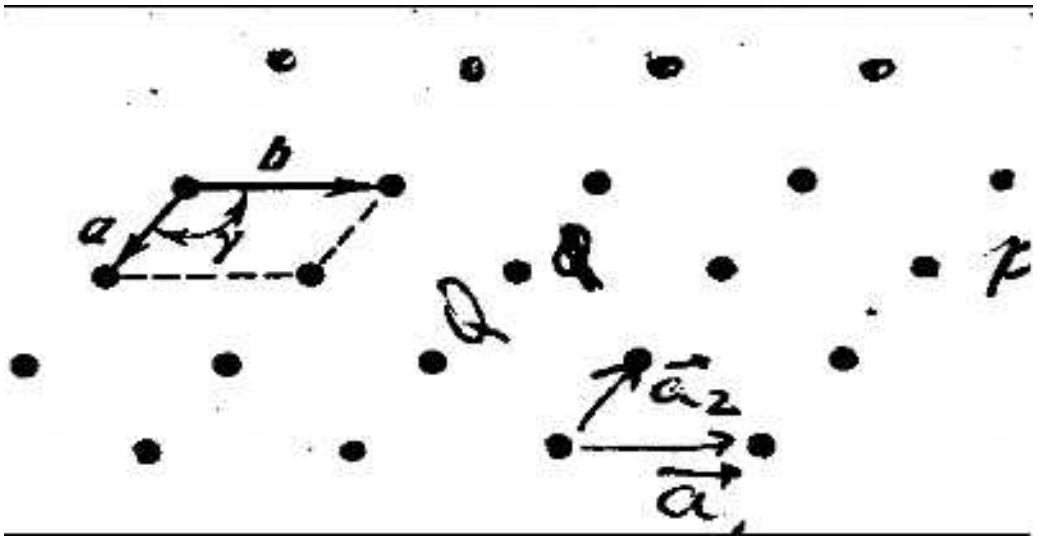
- все возможные целые числа (<0,0, >O).

- Поэтому, чтобы достигнуть точки Z с координатами ni ai необходимо проделать ni шагов длиной ai в направлении i=1,2,3. Как мы уже говорили векторы ai, называются основными векторами; они порождают решетку Бравэ.

Двумерные кристаллы

- Решетку двумерных кристаллов определим как параллельное, подобное узлам сетки расположение точек, причем около любой точки прочие точки распределены совершенно одинаково.
- Между решеткой и кристаллической структурой имеется существенное различие: кристаллическая структура – это такая совокупность или система, в которой с каждой точкой решетки связана некоторая группа атомов (называемая базисом), причем все группы идентичны по составу, расположению и ориентации

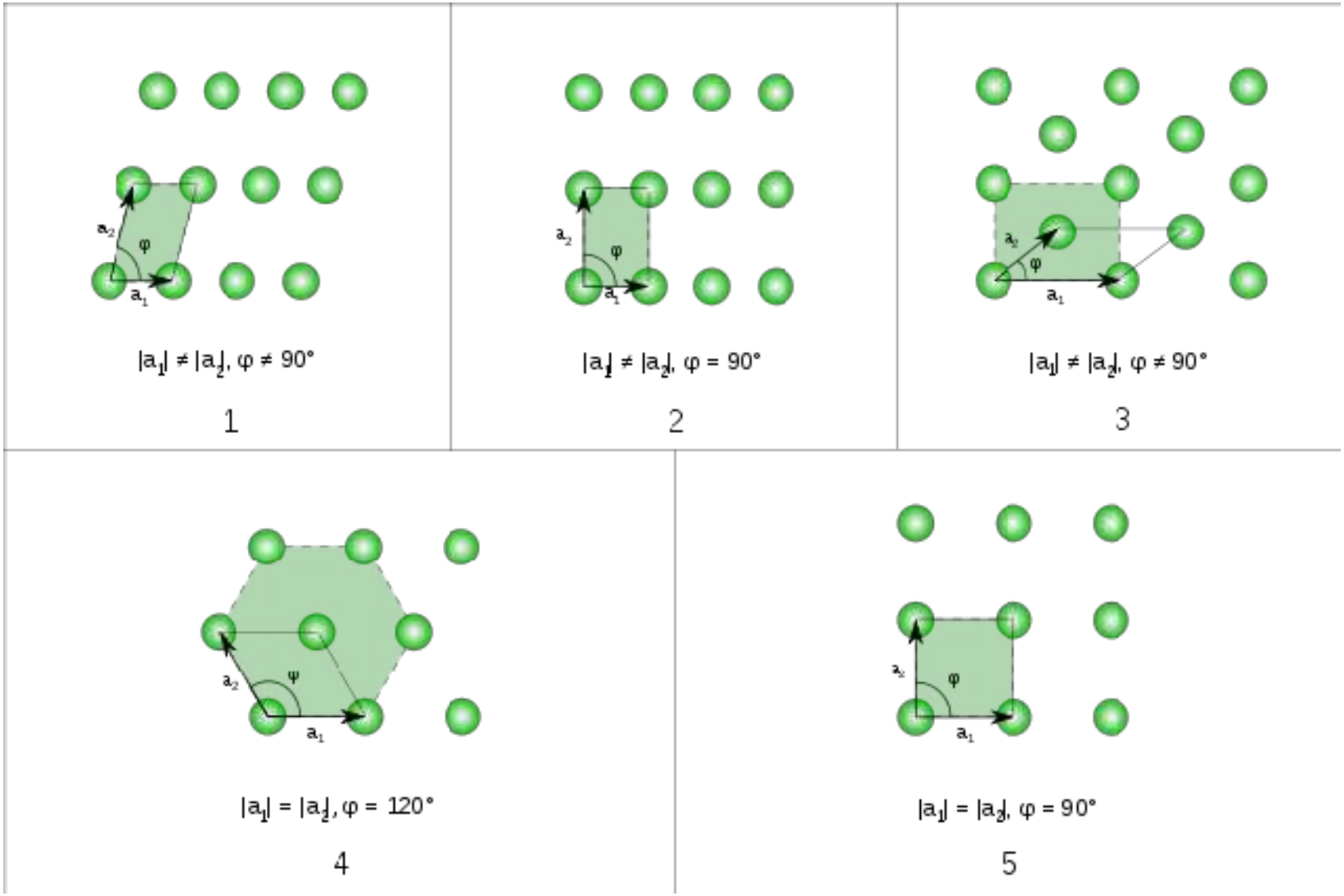




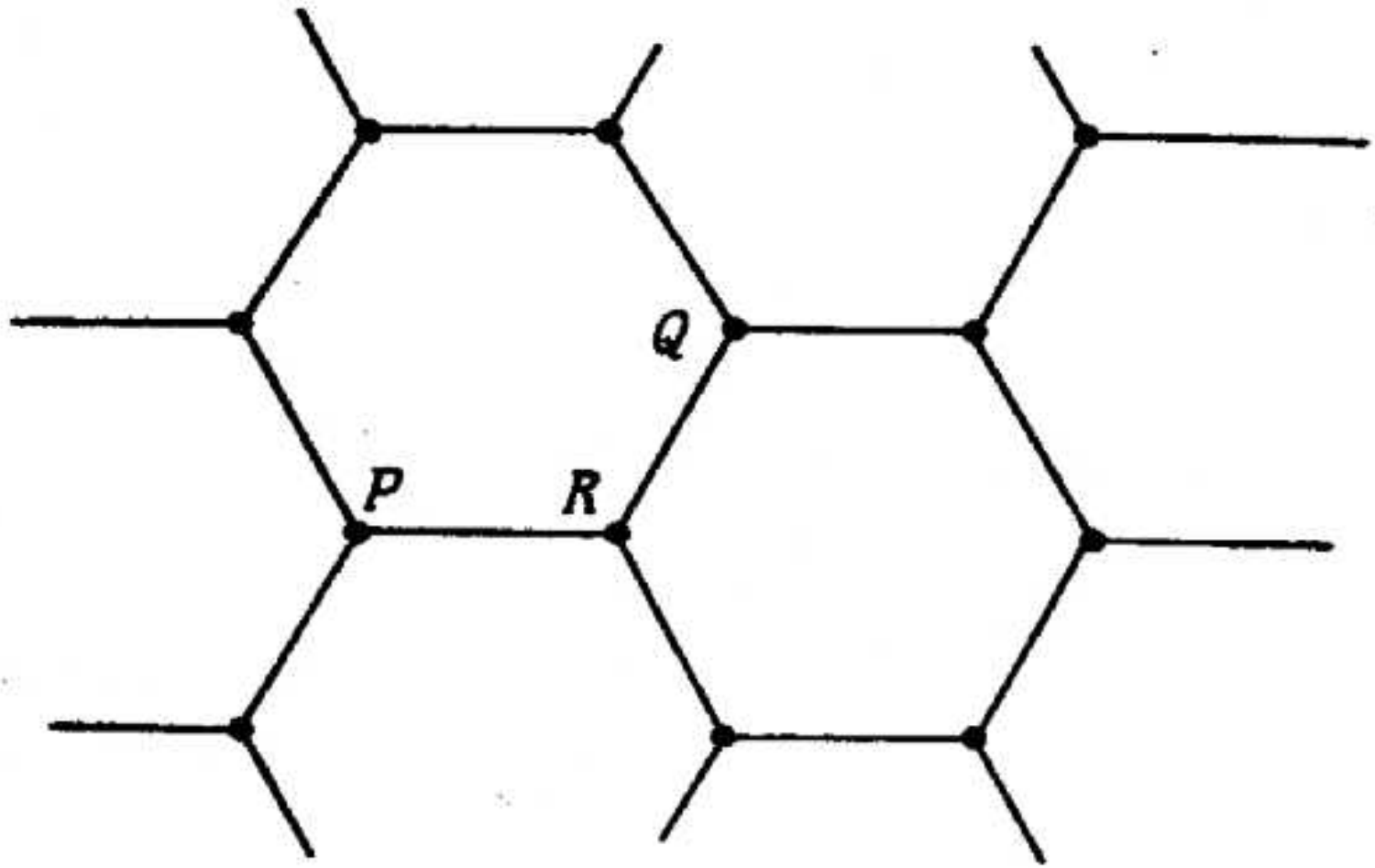
Решетка Бравэ в двумерном случае является, например косой сетью (без дополнительной симметрии)

- Образуемый этими векторами параллелограмм принять за примитивную ячейку, являющуюся частным случаем элементарной решетки ячейки. **Элементарная ячейка** – это такая структура, применение к которой операции трансляции покроет все точки плоскости на которую нанесена решетка.
- Элементарная ячейка, в узлах которой находятся только точки решетки, называется **примитивной ячейкой**

The five fundamental two-dimensional Bravais lattices: 1 oblique, 2 rectangular, 3 centered rectangular, 4 hexagonal, and 5 square



Является ли решетка типа пчелиных сот решеткой Браве?



Двумерные точечные группы.

Определим группу

- Пусть G — произвольное множество. Если при этом выполнены 4 условия (называемые *аксиомами группы*):

- задана некоторая операция, обычно называемая ***умножением*,** которая для любых двух элементов a, b из данного множества сопоставляет им единственным образом элемент, обозначаемый $a \cdot b$ или просто ab. При этом элемент ab называется ***произведением*** элементов a и b.

- для любых трех a, b, c из G верно равенство $(ab)c = a(bc)$ (закон ассоциативности);

- существует такой элемент e, что для любого элемента a из G верно равенство $ae = ea = a$ - существование единичного элемента

- для любого элемента a из G существует такой элемент b, что верно равенство $ab = ba = e$ (существование обратного); такой элемент b называется *обратным для элемента* a и обозначается a–1;
- то множество G относительно операции умножения образует *группу*.

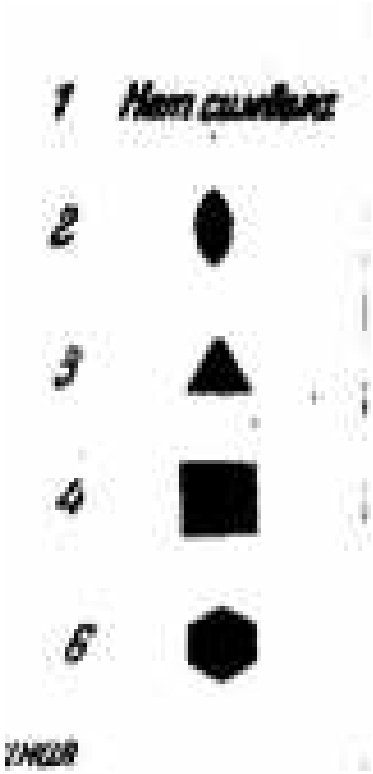
- Если при этом выполнена еще одна аксиома:
  для любых элементов a, b из G верно равенство $ab = ba$ (закон коммутативности), то группа называется *коммутативной* или *абелевой*

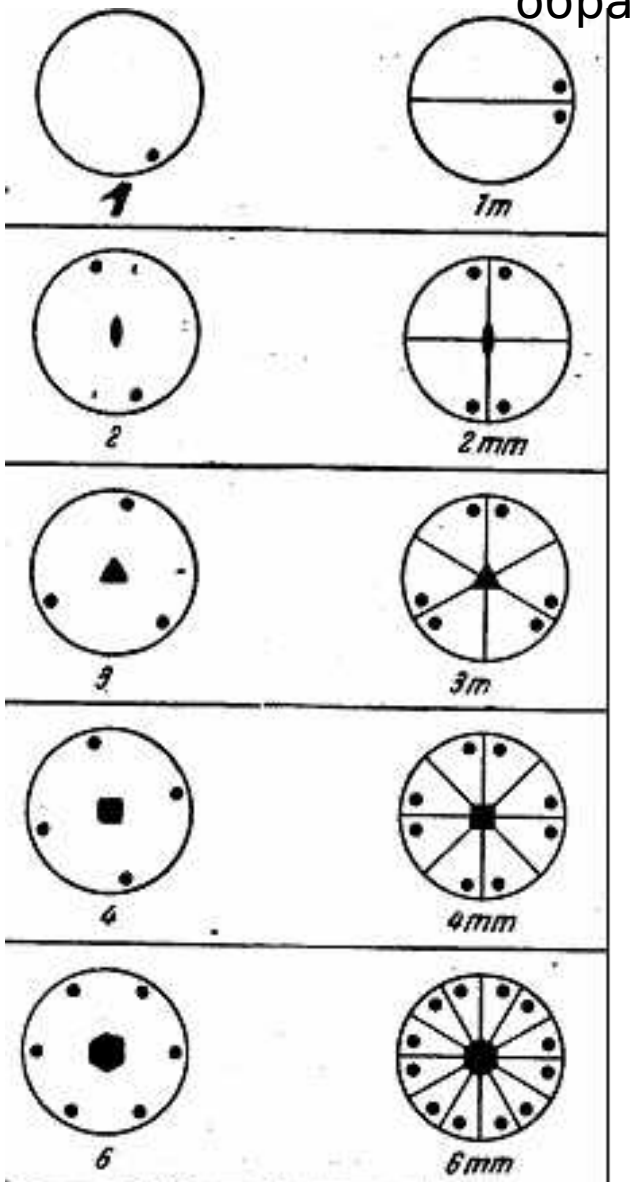
Операции симметрии двумерной кристаллографической точечной группы следующие:

- 1. Одно- двух- трех- четырех и шестикратные повороты вокруг точки.
- **2.** Зеркальное отражение относительно прямой линии. Повороты обозначаются числами **n**, указывающими их кратность, зеркальное отражение - символом **m**. Для плоской молекулы любой поворот на угол **2π/n** где n-целое число, может быть операцией симметрии.
- Для решетки, возможны повороты только со значениями n =1,2,3,4,6 с обязательным выполнением требования трансляционной симметрии.
- **<u>Двумерные кристаллографические точечные группы</u>**.
- Различные комбинации допустимых поворотов и отражений сводится к **десяти** различным двумерным точечным группам, разрешенным для двумерного кристалла.
- Эти группы обозначаются следующим обрезом:
- 1, 2, 1m, 2mm, 4, 4mm, 3, 3mm, 6, 6mm.
- **Первый** индекс в этой записи групп относится к повороту вокруг точки так, что например точечная группе 4 содержит четырехкратные повороты.
- **Второй** индекс указывает на наличие операций отражения относительно прямой линии перпендикулярной оси OX а также на другие линии зеркального отражения, связанные с данным поворотом.
- **Третий** индекс указывает на наличие других линий зеркального отражения, связанных между собой условиями симметрии, но не содержащихся среди первой системы линий зеркального отражения.

Кристаллы данной конкретной точечной группы объединяются в **кристаллический класс.**

Оси и операции симметрии изображают графически следующим образом:





Соответствие между двумерными решетками Браве и точечными группами симметрии

Решетка	Элементарная ячейка	Координатные оси	Система	Точечная группа симметрии
Косоугольная	параллелограмм	$a \neq в, \gamma \neq 90^0$	косоугольная	1,2
Простая прямоугольная. Центрированная. Прямоугольная.	прямоугольник	$a \neq в, \gamma = 90^0$		1m, 2mm
Квадратная	Квадрат	$a = в, \gamma = 90^0$	Квадратная	4, 4mm
Гексагональная	60^0 ромб	$a = в, \gamma = 120^0$	гексагональная	3, 3m, 6, 6mm

Кристаллическая структура

Кристаллическую структуру мы получим если с каждой точкой решетки (теперь мы можем сказать - решетки Бравэ) объединим группу атомов, которую назвали базисом. Если базис состоит лишь из одного атома в узле решетки (в этом случае обычно считают, что атом имеет сферическую форму) то о такой системе можно сказать лишь то, что кристаллическая структура полученная таким способом будет обладать высшей точечной группой симметрии, совместимой с соответствующей решеткой.

Система

Косоугольная 2 Точечная группа кристалла, соответствующая высшей симметрии.

Прямоугольная 2 mm

Квадратная

Гексагональная 6 mm

Эти точечные группы кристалла называются голоэдрическими.

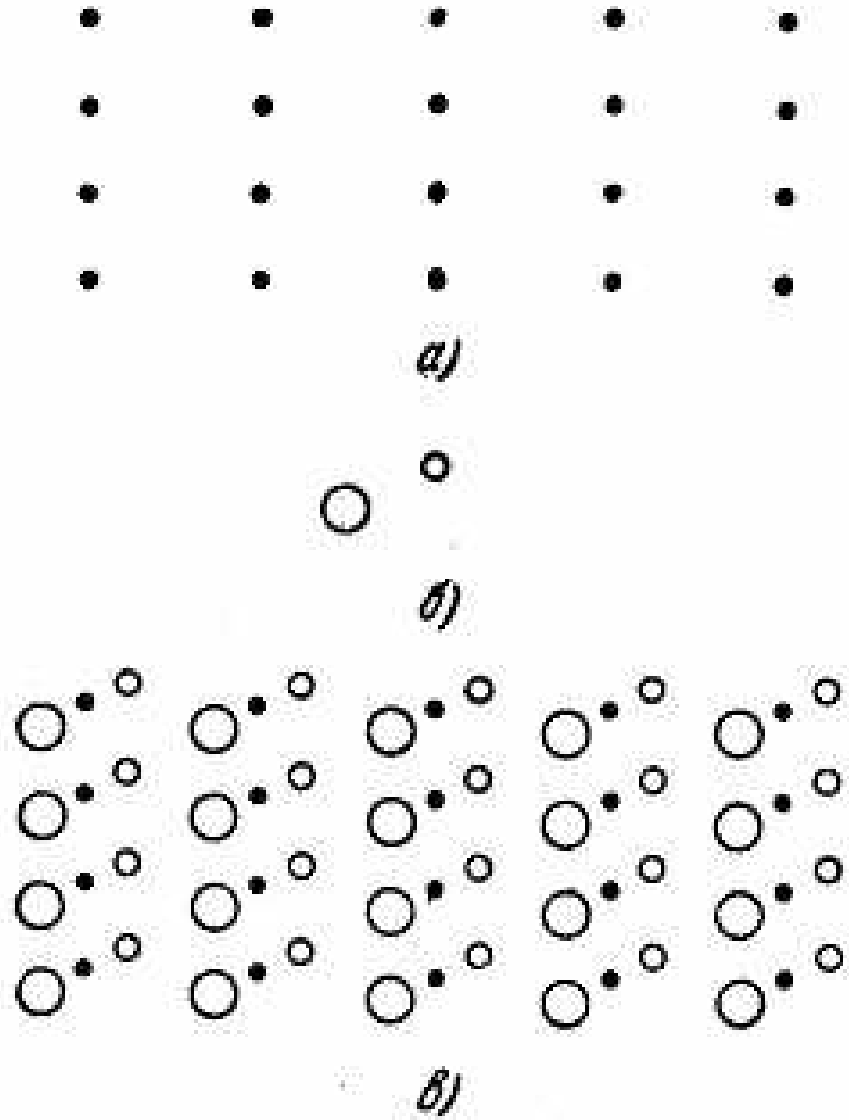


Рис. 1.1.

а — пространственная решетка; *б* — базис, содержащий два различных атома; *в* — кристаллическая структура, которая может рассматриваться как объединение базиса *б* с каждой точкой пространственной решетки *а*.

Предположим теперь, что базис образован одной молекулой, которая сама никакой точечной симметрией не обладает, т.е. имеет точечную группу 1. Естественно ожидать, что образованный из таких молекул кристалл будет принадлежать к косоугольной системе координат.

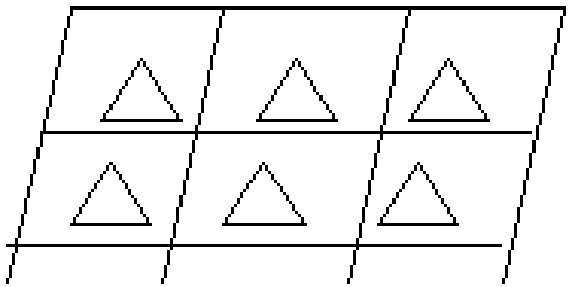


Рис.1

Косоугольная решетка, базисом которой служит молекула, обладающая точечной группой симметрии 1, что изображено косоугольным треугольником. Соответствующая пространственная группа обозначается p1;

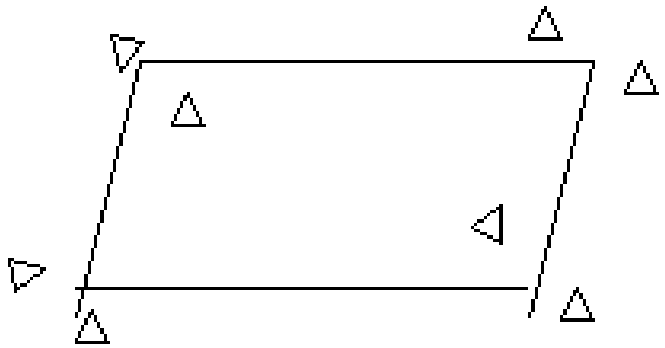
Это означает, что решетка является примитивной и ее точечная группа есть 1.

Если базис состоит из двух одинаковых молекул и обладает симметрией точечная группа 2 по отношению к середине прямой соединяющей молекулы, то можно ожидать, что и в этом случае кристалл попадет в косоугольную систему. 1

Из рис.2а можно видеть, что наиболее очевидные элементы симметрии таковы: оси второго порядка, проходящие через углы элементарной ячейки (ясно, однако, что другие оси второго порядка на рис. не могли быть показаны.

Набор элементов сим такой системы называется пространственной группой.

Проекция элементарной ячейки, обладающей симметрией, соответствующей полной пространственной группе р2 показана на рис.2б.



Пространственная группа – это повторяющийся набор элементов симметрии. Это не есть кристаллическая структура. Для того чтобы кристалллическая структура описывалась данной пространственной группой, она должна обладать всеми элементами симметрии этой пространственной группы и только ими.

Симметрия кристаллической структуры полностью определена если известна ее пространственная группа. Пространственная группа характерезуется решетко Бравэ и одновременно типом, расположением точек и другими элементами симметрии элементарной ячейки.

Пространственная группа составляющими ее элементами симметрии определяет положение эквивалентных точек в элементарной ячейке.

Если какая-либо точка элементарной ячейки занята, то данная пространственная группа будет описывать кристаллическую структуру, лишь когда все эквивалентные точки будут заняты одинаковыми атомами или молекулами.

В двухмерном случае имеется 17 различных пространственных групп.

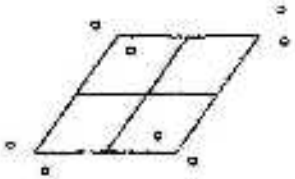
13 из них получаются просто «помещением» элементов одной из 10 плоских точечных групп в узлы соответствующей решетки Браве.

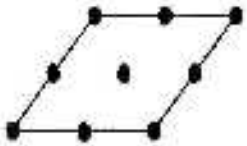
Двухмерные решетки, точечные и пространственные группы.

Система и символ решетки.	Точечная группа	Обозначение пространственной группы		Номер пространственной группы.
		полное	сокращение	
Косоугольная	1	p1	P1	1
p(примитивная)	2	P211	P2	2
Прямоугольная	m	P1m1	Pm	3
P		P1g1	Pg	4
		C1m1	cm	5
		P2mm	Pmm	6
	2mm	P2mg	Pmg	7
		P2gg	Pgg	8
И с (центрированная)		C2mm	cmm	9
Квадратная	4	P4		10
P	4mm	P4mm	P4m	11
		P4gm	P4g	12
Гексагональная	3	P3	P3	13
P	3m	P3m1	P3m1	14
		P31m	P31m	15
	6	P6	P6	16
	6mm	P6mm	P6m	17

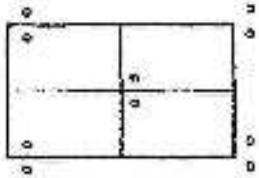
№1 p1 1 Косоугольная

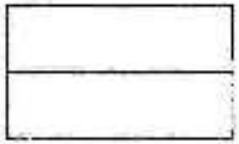
№2 p2l1 2 Косоугольная





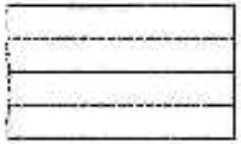
№3 p1m1 m Прямоугольная



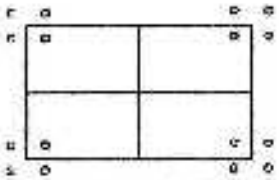


№4 p1g1 m Прямоугольная

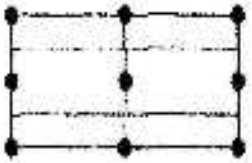
№5 c1m1 m Прямоугольная



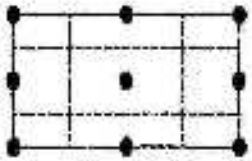
№6 p2mm mm Прямоугольная



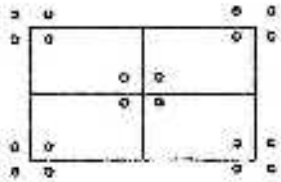
№7 p2mg mm Прямоугольная

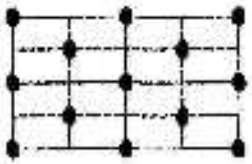


№8 p2gg mm Прямоугольная

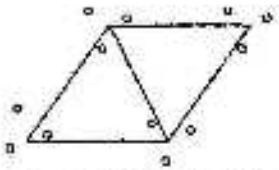


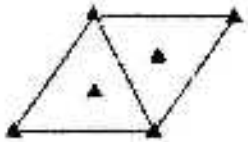
№9 c2mm mm Прямоугольная



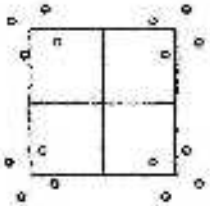


№13 p3 3 Гексагональная

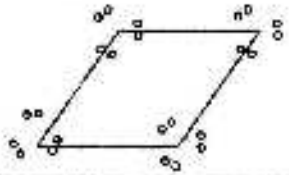


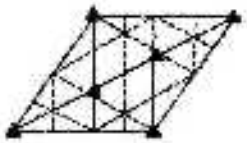


№10 p4 4 Квадратная

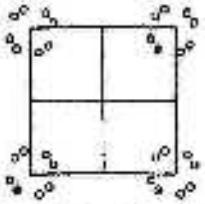


№14 p3m1 3m Гексагональная

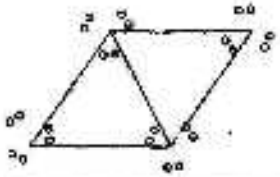


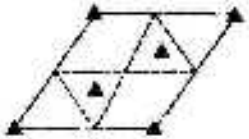


№11 p4mm 4mm Квадратная

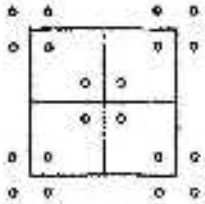


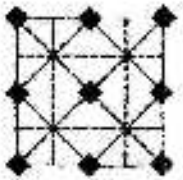
№15 p31m 3m Гексагональная



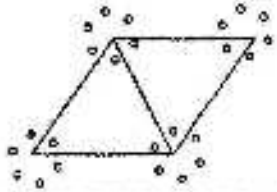


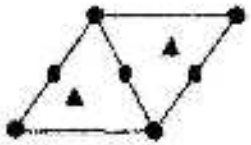
№12 p4gm 4mm Квадратная



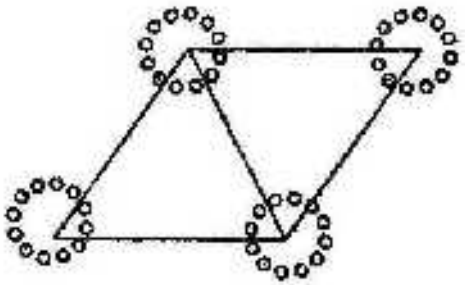


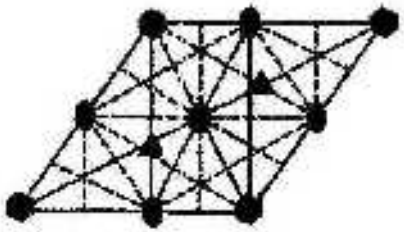
№16 p6 6 Гексагональная



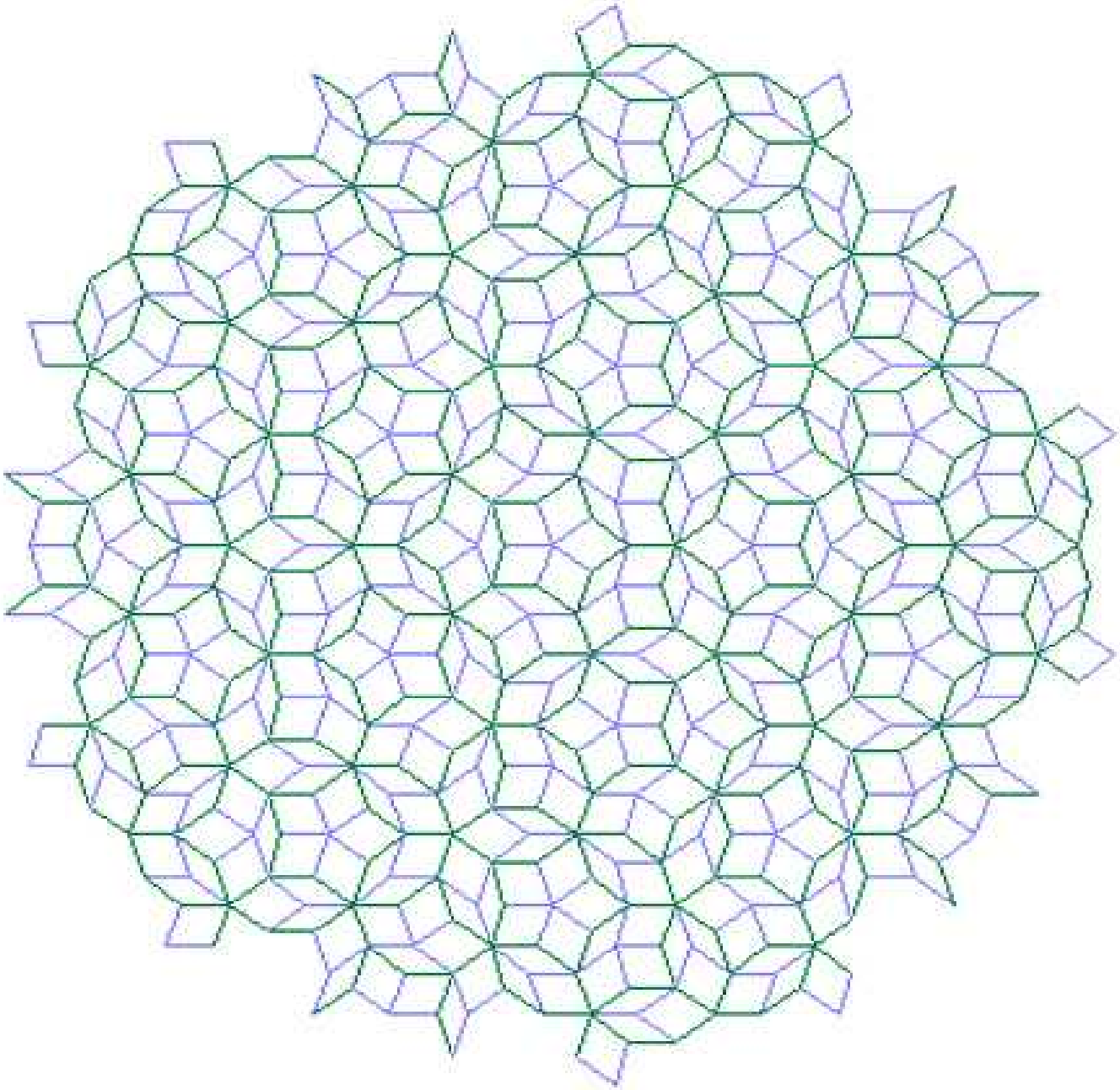


№17 p6mm 6mm Гексагональная

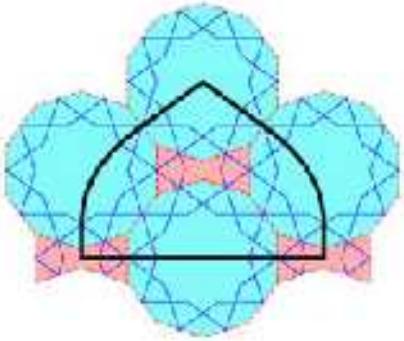


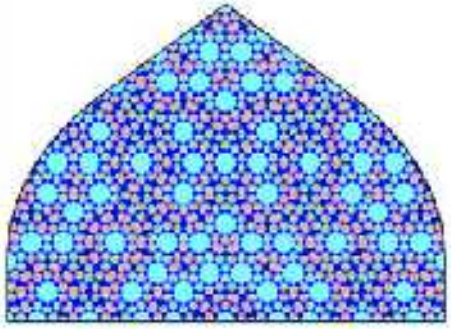


Пенроуз придумал способ разбиения плоскости. Мозаика Пенроуза. Она собрана из ромбов двух типов, один – с углом 72 градуса, другой – с углом 36 градусов. Картина из неё получается симметричная, но не периодичная



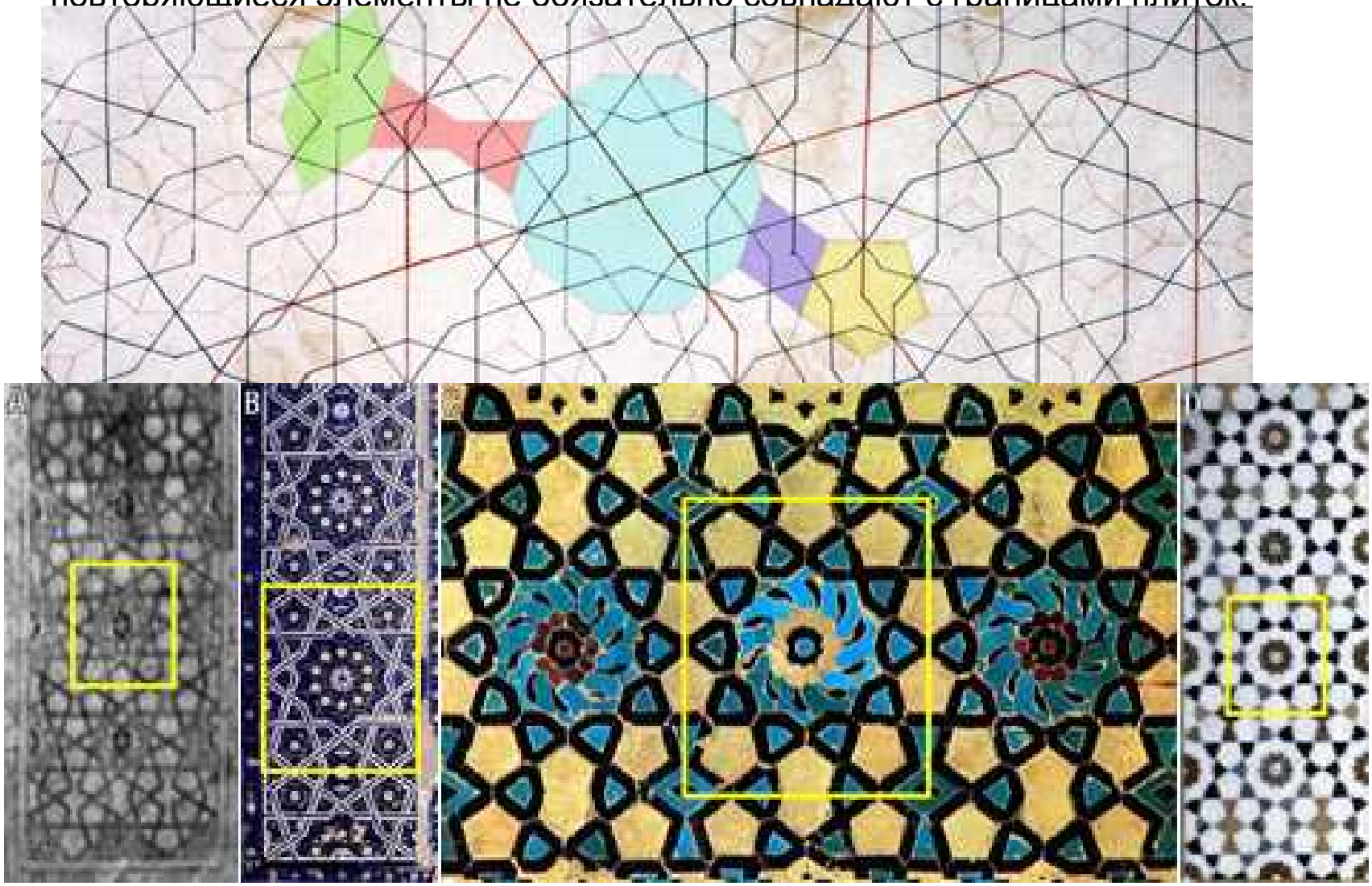
Портал святилища имама Дарб-и в Исфахане (Иран). Здесь друг на друга наложены две системы гирихов





Здесь показан один из образцов выкладки плитки,. Цветами исследователи выделили повторяющиеся области. На основе этих пяти элементов выстроены все геометрические узоры средневековых арабских мастеров. Как видите,

повторяющиеся элементы не обязательно совпадают с границами плиток.

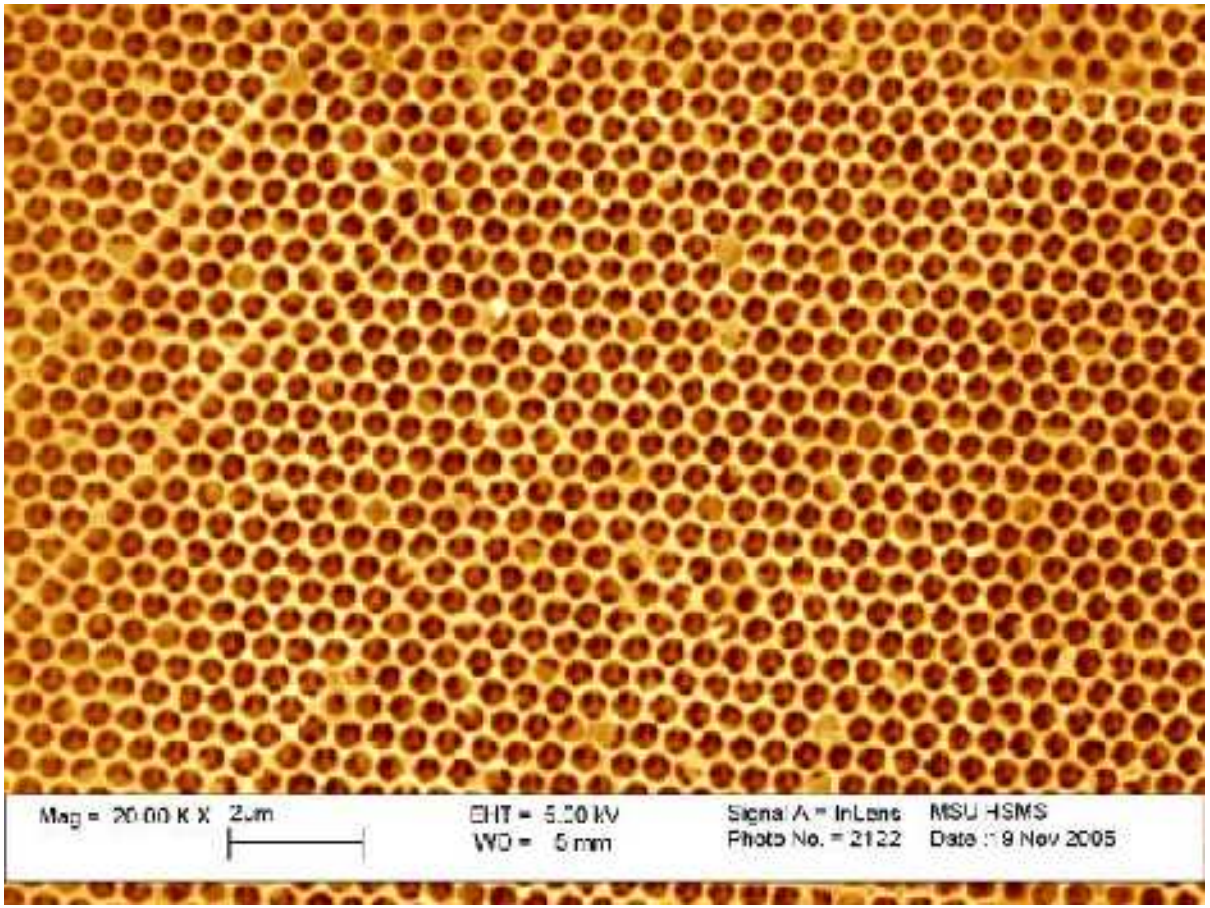


Наносоты

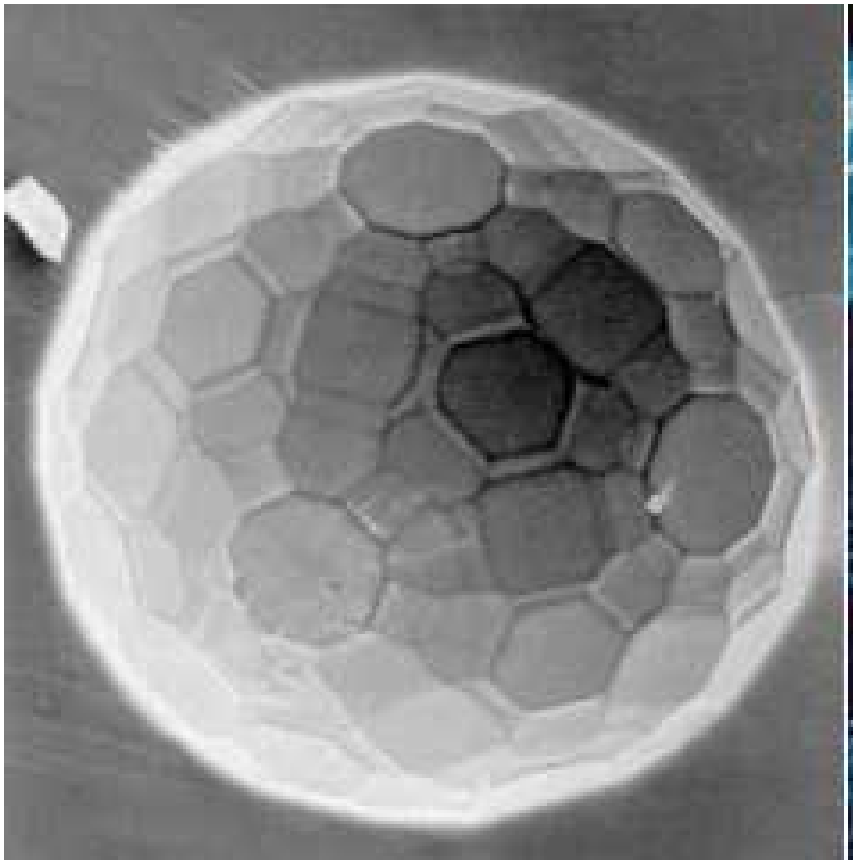
Несмотря на внешнее сходство, данная структура была создана не «нанопчелами». Материалы с системой упорядоченных нанопор были открыты только в середине 90х годов прошлого века и в настоящее время являются объектами интенственного изучения исследователей.

Структура, изображенная на микрофотографии, была синтезирована в результате многостадийного химического процесса: наносборка полимерных сферических частиц, пропитка пустот полученного матриала эфиром ортокремниевой кислоты, гидролиз и удаление полимерной матрицы путем температурной обработки.

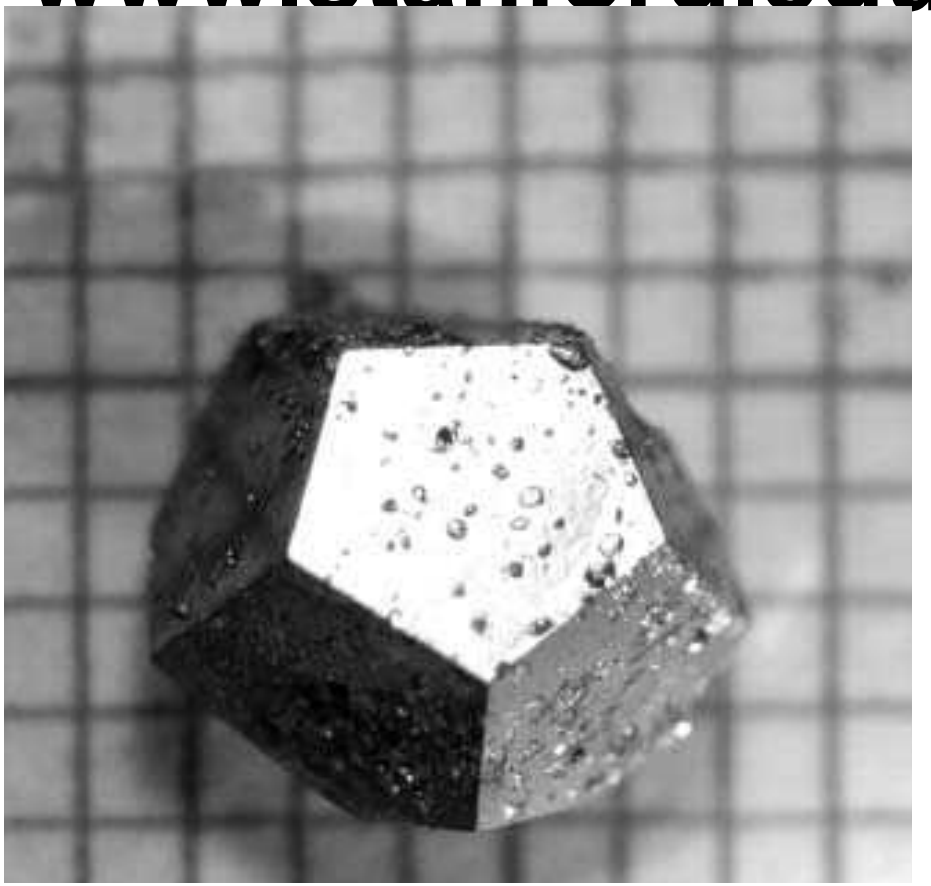
Материал стенок «наносот» – диоксид кремния SiO_2.

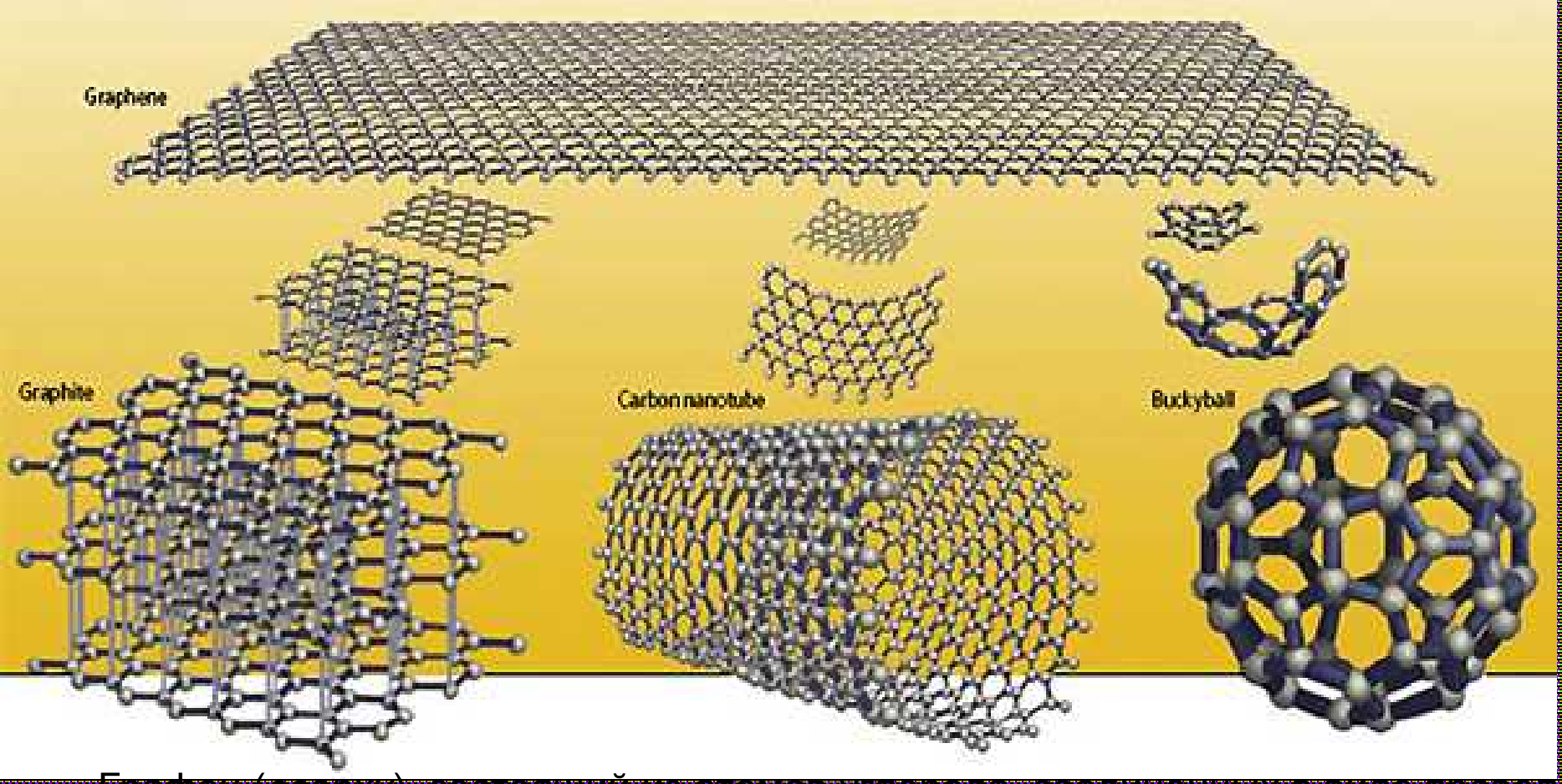


Примеры квазикристаллов – сплав AlMnPd и Al60Li30Cu10



Квазикристалл алюминий-палладий-рений. Фото с сайта www.stanford.edu





Графен (*вверху*), состоящий из атомов углерода, соединенных в виде правильной сетки, лежит в основе графита и фуллеренов. Графит (*нижний левый рисунок*), знакомый каждому в виде карандашного стержня, — это хрупкий материал, который можно представить как слоеный торт со слабо связанными листами графена. Когда графен сворачивается в трубку или сферу, то получаются фуллерены. Они подразделяются на цилиндрические, называемые углеродными нанотрубками (*снизу в центре*), и структуры в форме футбольного мяча (*внизу справа*), иногда называемые в честь их первооткрывателя шарами Бакминстера (buckyballs).

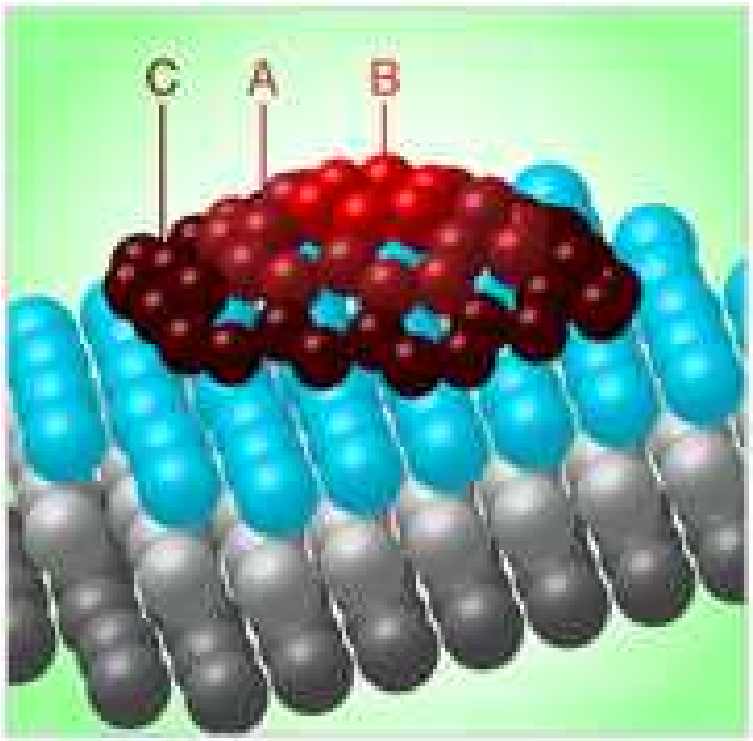
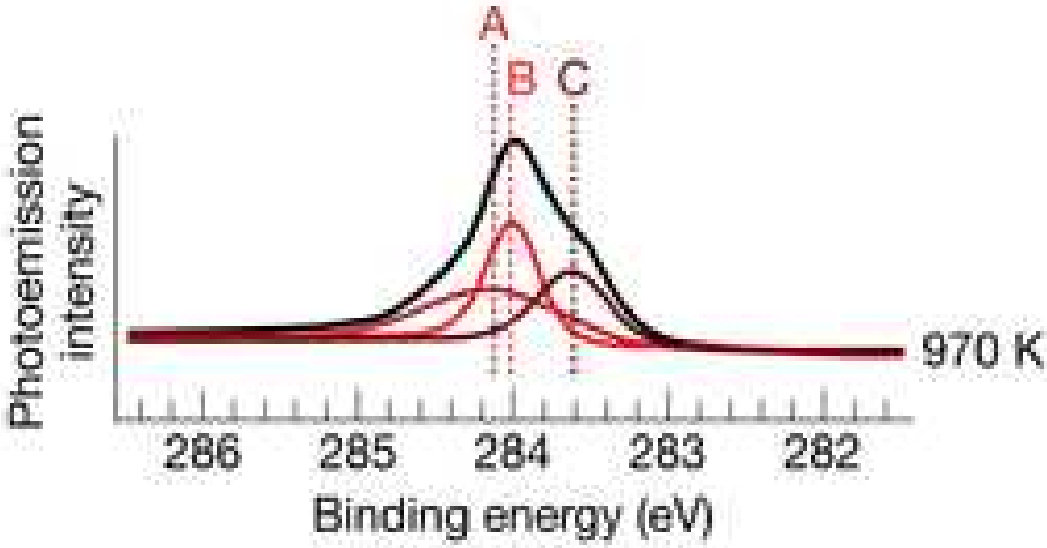



Figure 3: (Left) Carbon dome structure on an iridium substrate, indicating the tightly bound atoms at the edge of the island (C), the weakly bound atoms at the center (B) and intermediate atoms (A). (Right) Photoelectron spectrum at 970 K showing the contributions from the edge (C), center (B), and intermediate (A) atoms in the dome structure. (In this simplified schematic diagram, the dome structure is shown to consist of three types of carbon atoms; the actual structure is more complex.)