

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
АКАДЕМИИ НАУК СССР
(26—27 ноября 1986 г.)**

26 и 27 ноября 1986 г. в Институте физических проблем им. С. И. Вавилова АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

26 ноября

1. Г. Е. Воловик. Квазикристаллы.
2. В. Ш. Шехтман. Икосаэдрическая симметрия и дифракционный эксперимент.
3. П. А. Калугин, А. Ю. Китаев, Л. С. Левитов. О структуре квазикристаллов.

27 ноября

4. В. С. Шпинель. Ядерно-спектроскопические исследования сверхтонких взаимодействий для примесей в металлах.
 5. Г. Б. Христиансен. Установка для исследования космических лучей предельно высоких энергий.
- Краткое содержание четырех докладов приводится ниже.

548(048)

Г. Е. Воловик. Квазикристаллы. Первый квазикристалл был обнаружен Шехтманом и др.¹ (Национальное Бюро стандартов, США) в 1984 г. при быстром охлаждении расплава $Mn_{0.14}Al_{0.86}$ и с этого времени число квазикристаллов неуклонно растет. Этот новый класс упорядоченных веществ занимает промежуточное положение между регулярными классическими кристаллами и аморфными веществами. В отличие от аморфных тел, рентгенограмма квазикристалла содержит характерные для регулярного кристалла четкие брэгговские пики, но обладает осью симметрии 5-го порядка, что несовместно с трансляционной инвариантностью кристалла. Большинство квазикристаллов имеют точечную группу симметрии икосаэдра, но есть квазикристалл, состоящий из периодически повторяющихся плоскостей, каждая из которых имеет ось 5-го порядка².

Физическая причина возникновения квазикристаллических структур в несовместимости двух тенденций: на микроуровне кристаллохимия требует икосаэдрического либо пятиугольного ближнего порядка в упаковке атомов и поэтому навязывает среде выделенные оси 5-го порядка в направ-

лении химических связей, что противоречит тенденции к установлению трансляционного дальнего порядка. Математическая модель идеального квазикристалла, примиряющая эти тенденции, разработана в двух появившихся независимо теориях^{3,4}, впоследствии оказавшихся эквивалентными.

Левин и Стейнгардт³ построили модель квазикристалла, исходя не из одной элементарной ячейки, как в кристалле, а из двух элементарных ячеек с иррациональным отношением их количеств. Это обобщение на трехмерный случай двумерных аперриодических пятиугольных узоров Пенроуза, в которых плоскость заполняется двумя ромбами с острыми углами соответственно $\pi/5$ и $2\pi/5$ в отношении, равном золотому сечению $(\sqrt{5} + 1)/2$ (см., например,⁵). Определенные правила построения, основанные на числовой последовательности Фибоначчи, приводили к структуре, у которой периодичность в расположении атомов отсутствует, но имеется ряд свойств, характерных для кристалла: 1) дальний ориентационный порядок; 2) атомы расположены на «кристаллических» плоскостях; 3) есть δ -функциональные брэгговские пики, соответствующие отражению от этих плоскостей; 4) есть симметрия подобия — структура, получаемая удалением определенного набора узлов, отличается от исходной изменением масштаба в $(\sqrt{5} + 1)/2$ раз. Но есть и отличия: 1) «кристаллические» плоскости не эквидистантны, а квазипериодичны, т. е. расстояние между ними принимает два значения, чередуясь в последовательности Фибоначчи; 2) точечные брэгговские пики плотно заполняют пространство, но главные пики хорошо различимы из-за резкого отличия интенсивностей близких пиков.

Те же свойства у модели Калугина, Китаева, Левитова⁴, которые получили икосаэдрический квазикристалл исходя из «кубического» кристалла в 6-мерном пространстве. Из этого кристалла вырезается так называемая «труба» — слой атомов с размером порядка межатомного, заключенный между трехмерными гиперплоскостями, которая затем проектируется на физическое пространство. Такое построение позволяет получить континуальную теорию квазикристалла, описать дислокации и выяснить характер низкочастотных коллективных мод: помимо обычных фононов, возникающих за счет трех степеней свободы движения атомов вдоль трубы, в квазикристалле есть три «фазона», связанных с поперечным движением трубы в 6-мерном пространстве. Фазонные моды, хотя и обладают сколь угодно малой энергией, содержат перемещения отдельных атомов на большие расстояния и в отличие от фононов имеют диффузионный характер.

Обе модели хорошо объясняют расположение и интенсивность брэгговских пиков на электроно- и рентгенограмме. Однако есть и расхождение с экспериментом, который дает конечную ширину пиков, соответствующую размеру $\sim 100 \text{ \AA}$, на котором теряется трансляционный порядок. Причем это не связано с размером микрокристаллитов, который, если судить, например, по корреляционной длине ориентационного дальнего порядка, на два порядка больше (см.^{6,7}).

Расхождение скорее всего связано с тем, что реальный квазикристалл отличается от математической модели идеального квазикристалла, а именно, атомы в идеальном квазикристалле находятся в неэквивалентном и несимметричном окружении и их положения в узлах идеальной квазирешетки не являются положениями равновесия. Поэтому для получения реального квазикристалла атомы под действием нерегулярных сил со стороны соседей должны перестроиться, сместившись в положения равновесия. При этом нарушается квазипериодический дальний порядок, приводя к уширению δ -функциональных пиков идеального квазикристалла, и это связано с фазонными переменными, что легко проследить на континуальной модели квазикристалла.

Нерегулярные силы, действующие на фазонные переменные, не приводят к уширению рефлексов точно так же, как примеси в обычном кри-

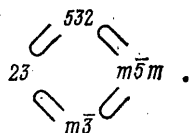
сталле не нарушают дальнего трансляционного порядка. Но те же силы, действующие на фазонные моды, приводят к расходимости корреляционной функции фазонов: труба в 6-мерном пространстве становится изогнутой с расходящейся амплитудой отклонения от базовой гиперплоскости. Это и приводит к конечной ширине пиков. Ориентационный дальний порядок при этом не нарушается; хорошо определенными остаются и дислокации, поэтому возможна фаза Березинского с топологическим трансляционным порядком: при обходе по контуру длины L вектор Бюргерса растет как $L^{1/2}$. Это отличает реальный квазикристалл от аморфного тела с ориентационным дальним порядком. Создание полной классификационной схемы твердых тел и жидкостей еще только предстоит. Возможно, эта схема будет основана на расширенной группе симметрии, включающей, например, статистическую симметрию и группу диффеоморфизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. // *Phys. Rev. Lett.* 1984. V. 53. P. 1951.
2. Bendersky L. et al. // *Scripta Metall.* 1985. V. 19. P. 909.
3. Levine D., Steinhardt P. J. // *Phys. Rev. Lett.* 1984. V. 53. P. 2477.
4. Калугин П. А., Китаев А. Ю., Левитов Л. С. // *Письма ЖЭТФ.* 1985. Т. 41. С. 119.
5. Маккей А. Л. // *Кристаллография.* 1981. Т. 26. С. 910.
6. Bancel P. A. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 54. P. 2422.
7. Nelson D. R. // *Sci. American.* 1986. V. 255. No. 2. P. 32.

548(048)

В. Ш. Шехтман. Икосаэдрическая симметрия и дифракционный эксперимент. Обнаружение новых принципов упаковки атомов в твердых телах требует более детального рассмотрения групповых соотношений между моделью квазикристалла и кристаллической решеткой. Так, системы с симметрией пятого порядка примыкают к семействам кристаллографических точечных групп, объединяемых семью предельными фигурами Кюри. Более того, если отсутствуют ограничения, связанные с трансляционной решеткой, две группы икосаэдрической сингонии являются естественным и единственным добавлением к привычным тридцати двум группам. При этом выполняется минимальное требование — конечная группа вращений, построенная на неортогональных поворотных осях. Таким образом, к иерархии высших предельных групп шара (∞/∞ и $\infty/\infty mmm$) причислены только две сингонии: кубическая — группы $432, 23, m\bar{3}m$ и икосаэдрическая — группы $532, m\bar{5}m, m\bar{3}$. Сразу же можно указать важные подгрупповые цепочки



Далее полезно выявить геометрические связи между решетками Браве и квазикристаллическими упаковками, если учесть общие свойства правильных многогранников. Известно, что существует всего пять так называемых тел Платона² с числом граней 4, 6, 8, 12 и 20. На языке кристаллографии все они являются простыми формами (частными) кубической либо икосаэдрической сингонии (рис. 1). Для данного изложения существенно, что имеются способы взаимного вложения указанных фигур; например, куб вписывается в двенадцатигранник с пятиугольными гранями. Пусть куб принадлежит к группе $m\bar{3}$, т. е. среди его элементов симметрии отсутствуют