Фазовые переходы, симметрия и ее нарушение

1. Простые примеры:

- Аммиак и инверсия
- Кристаллическая решетка
- Магниты: масса способов устроить жизнь спинов как им хочется
- Сверхтекучий гелий и сверхпроводимость: что общего у куска свинца и банки с гелием ?

Теоретическая физика и иерархическая структура науки

Что такое «фундаментальные проблемы» ?

По мотивам статьи P.W.Anderson

«More is different», “*Science*”, 1972

http://www.sccs.swarthmore.edu/users/08/bblonder/phys120/docs/anderson.pdf

P.W.Anderson, “More is different”

according to the idea: The elementary entities of science X obey the laws of science Y.

X	Y
solid state or many-body physics	elementary particle physics
chemistry	many-body physics
molecular biology	chemistry
cell biology	molecular biology
•	•
•	•
•	•
psychology	physiology
social sciences	psychology

Что происходит при переходе от «несколько» к «очень много» ?

P.W.Anderson «More is different», “*Science*”, 1972
http://www.sccs.swarthmore.edu/users/08/bblonder/
phys120/docs/anderson.pdf

Есть 3 главные группы явлений:

Первая: хорошо исследованные «обычные» фазовые переходы

Вторая : системы с «памятью», т.е. нарушенной эргодичностью

Третья: системы с квантовым топологическим порядком

Общее свойство:

Нарушение симметрии ведёт к увеличению «степени упорядоченности» - т.е. к уменьшению ЭНТРОПИИ

При T=0 энтропия = 0:

«теорема Нернста» или

3-й закон термодинамики

2. Нарушение «однородности времени»

- Стёкла и «спиновые стёкла»
- Модели ассоциативной памяти
- Алгоритмы оптимизации
- Проблема генетического кода

Здесь труднее говорить о «порядке» и энтропии: неравновесные системы

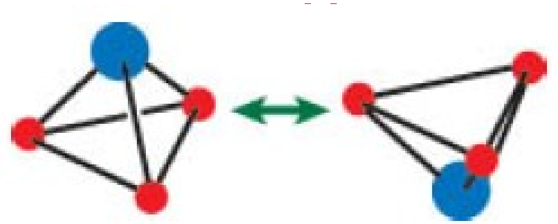
3. Квантовый «скрытый порядок»

- Вопрос: может ли так быть, что энтропия = 0,   без нарушения симметрии ?
- Ответ: да. Это бывает в системах, называемых

  «спиновые жидкости»

Здесь, если и есть какое-то нарушение симметрии, его очень трудно выявить - что полезно для создания   *квантового компьютера*

Туннелирование и нарушение симметрии



ереходов f= 24 Ггц

Нет дипольного момента !

Истинное основное состояние молекулы аммиака:

(|**+>** + |**-** > **)/√2** Оно симметрично

- **Состояние** **(|+> - |- >)/√2** **имеет энергию выше**
- **на** E=hf ≈ 0.1 мэВ

Заменим H на D (дейтерий) или на T (тритий). Что изменится ?

f_D= 1.6 Ггц f_T= 0.3 Ггц

молекула PF_3 *вообще не осциллирует !?! Диполь!*

Где и как проходит граница между «квантовым» и «классическим» ?

Все решает «добротность» Ω / Γ осциллятора $X(t) = \cos(\Omega t)\exp(-\Gamma t)$

коэффициент затухания Γ определяется связью с «резервуаром» - то есть со всем внешним – по отношению к молекуле - миром

A. Leggett и др. 1981 - начало количественной теории квантово-классического перехода

«Большая» система классична и ее состояние может нарушить симметрию уравнений движения

Кристаллическая решетка: нарушение симметрии по сдвигу

Остался ли «след» от этой «спонтанно нарушенной» симметрии ?

- Да! появилась лишняя «мягкая мода» - поперечный звук. Так *всегда* бывает при спонтанном нарушении непрерывной симметрии

  («теорема Голдстоуна», ≈1965)

Как связаны симметрия решетки и тип фазового перехода плавления ?

- Квадратная или простая кубическая могут плавиться 2-ым родом.
- Треугольная или ГЦК- только 1-ым родом

(теория Ландау для фазовых переходов, 1937)

Магнитный порядок

- <u>Ферромагнетик</u>: $E = -J\,\Sigma_{(ij)}\,S_i\,S_j$

S_i - вектор «спина» (магнитного момента) в i-ом узле

$J > 0$: энергия минимальна для

При температурах $T < T_c$ $\langle S_i \rangle \neq 0$ -

<u>Нарушение симметрии !</u>

А какой именно?

1. S = +1 или -1 «модель Изинга» Z_2
2. $\boldsymbol{S} = (S_x, S_y)$ XY – модель O(2)
3. $\boldsymbol{S} = (S_x, S_y, S_z)$ магнетик Гейзенберга O(3)

Когда такое бывает ?

- В трехмерной решетке спинов всегда есть такая температура Кюри $T_c > 0$ Теория Ландау (1937)
- В одномерной цепочке никогда не бывает фазового перехода и равновесия фаз, если взаимодействие локально (Ландау 1950)
- В двумерных решетках все гораздо хитрее!

- Z_2: фазовый переход (теория Онзагера, 1944)
- O(2): фазовый переход без нарушения симметрии

  (теория Березинского-Костерлица-Таулеса, 1971-74)
- O(3): нет фазового перехода (Поляков, Вигман 1977-85)

Магнитный порядок -2

- Антиферромагнетики $E = -J\ \Sigma_{(ij)}\ S_i\ S_j$

S_i - вектор «спина» (магнитного момента) в i-ом узле $J < 0$: энергия минимальна для “staggered” конфигурации ↑↓↑↓

Определим $\boldsymbol{\sigma}_k = (-1)^k\ S_k$ и получим

$$E = -|J|\ \Sigma_{(ij)}\boldsymbol{\sigma}_i\ \boldsymbol{\sigma}_j \quad ???$$

Да, но лишь для “*bipartite*” решеток

АФМ на квадратной решетке

↑↓↑↓↑ **Изменение симметрии решетки:**

↓↑↓↑↓ **удвоение периода**

↑↓↑↓↑ **Кроме того, нарушение**

O(2) или O(3) вращений

АФМ на треугольной решетке ?

↑ ↓ **Неизвестно, где минимум E :**

? ***«фрастрация»***

В результате возникают «экзотические» фазы вещества, о коих пойдет речь позднее (стекла, спиновые жидкости…)

Как происходит фазовый переход ?

- Теория Ландау (1937) – общая для всех переходов 2-ого рода, но приближенная

  $$M \sim (T_c - T)^{1/2}$$

- Теория Онзагера (1944) – точная, но применимая лишь для двумерной модели Изинга: $M \sim (T_c - T)^{1/8}$

Они дают очень различные ответы. Попытки понять это привели к созданию современной теории фазовых переходов (1964-1985: В.Покровский и А.Паташинский, L.Kadanoff, K. Wilson, А.Мигдал и А.Поляков, R.Baxter)

Сверхтекучесть и сверхпроводимость: симметрия проста, но невидима

Сверхтекучесть ^{4}He: при T=0 жидкость Бозе-частиц находится в состоянии «конденсата», когда у всех частиц импульсы = 0

Похоже на когерентное состояние множества фотонов, образующих классическую световую волну

Отличие: поле Бозе-частиц описывается комплексной функцией $\Psi(\mathbf{r},t)$

Их плотность $N(\mathbf{r},t) = |\Psi(\mathbf{r},t)|^2 + n_{norm}(\mathbf{r},t)$

При $T > T_c$ $\Psi=0$ и все частицы «нормальные».

При $T < T_c$ нарушение симметрии $\Psi \to \Psi\exp(i\delta)$: по сдвигу фазы коллективной волновой функции

$T_c = 2.1$ K для ^{4}He

O(2) = U(1)

“XY” = Бозе-конд.

Скейлинговая теория фазовых переходов 2-ого рода

- Особенности физ. величин (намагниченность, теплоемкость, …) около точки перехода - степенные
- Показатели степени зависят только от симметрии и размерности пространства

Пример: $C(T) \sim -\ln(T\text{-}T_c)$ или $(T\text{-}T_c)^{-a}$, $a \ll 1$

для He-4 и для магнетика с симметрией O(2) «легкая плоскость» и для сверхпроводника.

Но в сверхпроводнике такое поведение обычно

не наблюдаемо! *Универсальность и ее пределы*

Стекла: порядок, скрытый в беспорядке

- «Спиновые стекла» - магнитные сплавы типа

$Cu_{1-x}Mn_x$ или $Au_{1-x}\,F_x$ $(x << 1)$ и другие

$$E = \Sigma_{(ij)} J_{(ij)} S_i\, S_j$$

Знаки $J_{(ij)}$ случайны !

Другой пример - диполи:

$$V_{ij}^{ab} = (\delta_{ij}^{ab} - 3n_{ij}^{a}\, n_{ij}^{b})/r_{ij}^{3}$$

Какое состояние при низких темпер. ?