

## Прыгающие шарики — модель фазовых переходов и неустойчивостей (10 баллов)

Перед выполнением этого задания прочтите Инструкцию в отдельном конверте.

### Введение

Переход воды из одного агрегатного состояния в другое является одним из примеров фазовых переходов в нашей повседневной жизни. Фазовый переход характеризуется изменением в коллективном поведении молекул и происходит при так называемой температуре фазового перехода (например, температуре замерзания или кипения воды).

Фазовые переходы также происходят в магнитных и сверхпроводящих материалах: при понижении температуры ниже температуры фазового перехода магнитное вещество переходит из парамагнитного в ферромагнитное состояние, а нормальная проводимость сверхпроводника — в сверхпроводимость.

Такие переходы могут быть описаны универсальным образом с помощью понятия *параметра порядка*. Например, в магнетизме параметр порядка характеризует выстраивание магнитных моментов атомов вдоль направления макроскопической намагниченности.

В так называемых фазовых переходах второго рода параметр порядка равен нулю выше критической температуры и непрерывно растёт при понижении температуры ниже критической (см. рис. 1). На рисунке также показано, что ниже критической температуры при ферромагнитном состоянии магнитные моменты индивидуальных атомов упорядочиваются и приводят к макроскопической намагниченности, в то время как выше критической температуры при парамагнитном состоянии они ориентированы хаотично и макроскопическая намагниченность равна нулю.

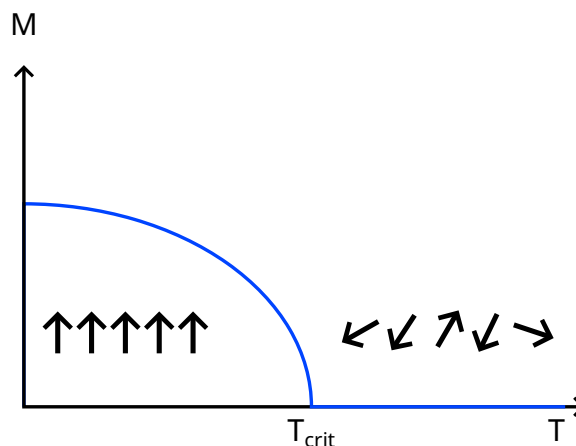


Рисунок 1. Качественный график зависимости параметра порядка  $M$  от температуры вблизи фазового перехода второго рода. Параметр порядка больше нуля ниже критической температуры

В фазовых переходах второго рода при температурах близких к критической параметр порядка —

степенная функция от температуры. Так, в магнетизме намагниченность  $M$  равна:

$$M \begin{cases} \sim (T_{\text{crit}} - T)^b, & T < T_{\text{crit}} \\ = 0, & T \geq T_{\text{crit}} \end{cases} \quad (1)$$

где  $T$  — температура. Более того, эта зависимость достаточно универсальна и степень  $b$  в этой зависимости одинакова для многих фазовых переходов второго рода различной природы.

### Задание

На простом примере мы изучим некоторые свойства фазовых переходов второго рода, например, как наличие неустойчивости приводит к изменению в коллективном поведении частиц, а также как это изменение связано со степенью их возбуждения.

Обычно при изучении фазовых переходов второго рода рассматривается возбуждение частиц под воздействием температуры. В нашем случае возбуждение соответствует кинетической энергии частиц, приводимых в движение мембраной динамика. Макроскопическое изменение, соответствующее фазовому переходу, — собиранию шариков в одной из половин цилиндра, разделённых небольшой стенкой.

Постепенно увеличивая амплитуду от того значения, когда шарики собираются в одной половине цилиндра, можно обнаружить, что в конце концов при некотором значении амплитуды шарики будут распределены поровну между двумя половинами. Это аналогично нагреванию системы выше критической температуры.

Ваша цель — определить степень  $b$  в модели изучаемого фазового перехода.

## Список оборудования

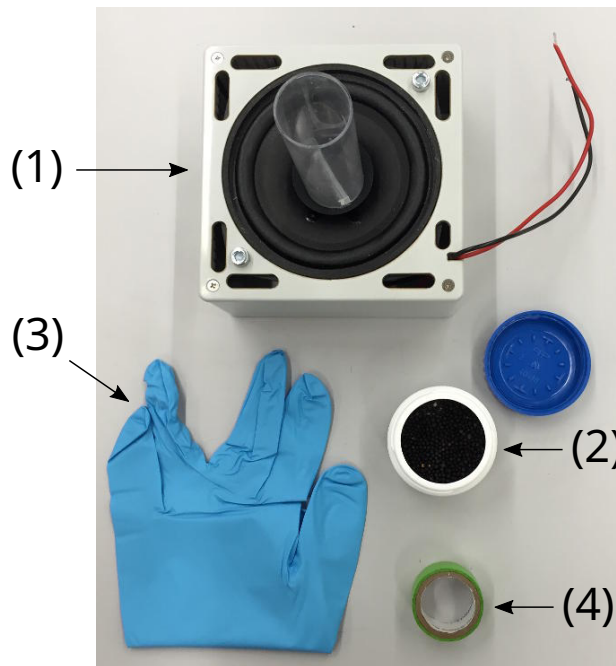


Рисунок 2. Дополнительное оборудование для этого эксперимента

- (1) Динамик с приклеенным к мембране пластиковым цилиндром
- (2) Около 100 шариков (маковых семян) в контейнере
- (3) Перчатка
- (4) Скотч

## Меры предосторожности

- Не прикладывайте к цилиндру чрезмерных боковых усилий. Если от мембраны оторвётся цилиндр или порвётся сама мембрана динамика, замены оборудования не предусмотрено.
- Выключайте динамик всякий раз, когда не используете его, чтобы не разряжать батарейку.
- В данном эксперименте пилообразный сигнал частотой 4 Hz подается на выходы, расположенные сбоку генератора сигналов.
- Амплитуду сигнала можно менять, вращая винт правого потенциометра, помеченного как «*speaker amplitude*» (4). Постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде сигнала, подаётся на клемму (6) на передней панели, помеченную как «*speaker amplitude*» (по отношению к земле (7)). Здесь цифры соответствуют цифрам на рисунке 2 из Инструкции.
- Мембрана динамика очень нежная. Не прикладывайте к ней больших усилий как вертикальных, так и боковых.

## Часть А. Критическая амплитуда возбуждения (3.3 балла)

Для начала подсоедините динамик к боковым выходам генератора с соблюдением полярности. Аккуратно насыпьте около 50 шариков в цилиндр, отрежьте от перчатки часть пальца, и натяните отрезанную часть на верхний торец цилиндра, чтобы предотвратить выпрыгивание шариков. Подайте сигнал на динамик тумблером на передней панели генератора и подстраивайте амплитуду сигнала, вращая винт потенциометра «*speaker amplitude*» (4) отвёрткой. Подберите амплитуду, при которой шарики соберутся в одной из половин цилиндра.

В качестве первого задания, вам будет необходимо определить критическую амплитуду фазового перехода. Для этого необходимо подсчитать число семян  $N_1$  и  $N_2$  в каждой половине сосуда (выбирая индексы так, что  $N_1 \leq N_2$ ) как функцию от амплитуды  $A_D$  — напряжения на выходе разъёма «*speaker amplitude*» (6). Это напряжение пропорционально амплитуде пилообразного сигнала. Сделайте не менее 5 измерений на каждое значение напряжения

Указание:

- Для того, чтобы движение частиц было всегда достаточным, работайте в этой задаче только с амплитудами напряжения «*speaker amplitude*» больше 0.7 В. Начните с наблюдения поведения системы при изменении напряжения без непосредственного подсчёта шариков. Может так получиться, что некоторые шарики прилипнут к дну из-за статического электричества. Исключите такие шарики из подсчёта.

|            |   |       |
|------------|---|-------|
| <b>A.1</b> | Запишите число частиц $N_1$ и $N_2$ в двух половинах цилиндра для нескольких разных значений амплитуды $A_D$ в <b>таблицу A.1</b> . | 1.2pt |
|------------|---|-------|

|            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>A.2</b> | Вычислите среднеквадратическое отклонение измерений числа частиц $N_1$ и $N_2$ и запишите результат в <b>таблицу A.1</b> . Постройте графики зависимости числа частиц $N_1$ и $N_2$ от амплитуды $A_D$ (включая погрешность измерений) на <b>графике A.2</b> . | 1.1pt |
|------------|--|-------|

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| <b>A.3</b> | Из построенного графика определите критическую амплитуду $A_{D,crit}$ при которой $N_1 = N_2$ после достижения стационарного состояния. | 1pt |
|------------|---|-----|

## Часть В. Калибровка (3.2 балла)

Амплитуда  $A_D$  имеет отношение к напряжению сигнала, подаваемого на динамик. С физической точки зрения более важный параметр — амплитуда колебания самой мембраны динамика, так как именно она показывает степень возбуждения шариков. В этом пункте требуется прокалибровать амплитуду  $A_D$ . Для достижения этой цели вы можете использовать любой из предоставленных вам предметов и материалов.

|            |   |       |
|------------|---|-------|
| <b>B.1</b> | Нарисуйте схему установки для измерения амплитуды возбуждения, т.е. максимального отклонения $A$ (мм), которое совершает мембрана за один период колебаний. | 0.5pt |
|------------|---|-------|

|            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>B.2</b> | Определите амплитуду $A$ в мм для разумного числа точек, т.е. запишите амплитуду $A$ как функцию амплитуды $A_D$ в <b>таблицу B.2</b> и укажите погрешности измерений. | 0.8pt |
|------------|--|-------|

|            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>B.3</b> | Полученные данные отобразите на <b>графике B.3</b> , включая погрешности.              | 1.0pt |
| <b>B.4</b> | Аппроксимируйте полученную кривую подходящей функцией $A(A_D)$ и найдите её параметры. | 0.8pt |
| <b>B.5</b> | Определите критическую амплитуду $A_{crit}$ возбуждения семян.                         | 0.1pt |

### Часть C. Показатель степени (3.5 балла)

В нашей системе температура соответствует сообщаемой кинетической энергии возбуждения. Эта энергия пропорциональна квадрату скорости колебаний мембраны громкоговорителя:  $v^2 = A^2 f^2$ , где  $f$  — частота колебаний. В этой части мы проверим эту зависимость и определим показатель степени  $b$  функции, описывающей параметр порядка (см. уравнение 1).

|            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>C.1</b> | Коэффициент $\left  \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right $ хорошо подходит в качестве параметра порядка для нашей задачи, так как он равен нулю при амплитудах выше критической и равен единице при малом возбуждении. Определите этот параметр порядка как функцию от амплитуды $A$ . Запишите ваш результат в <b>таблицу C.1</b> . | 1.1pt |
| <b>C.2</b> | На <b>графике C.2</b> постройте зависимость $\left  \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right $ от $ A_{crit}^2 - A^2 $ в двойных логарифмических координатах. Для расчётов можно использовать <b>таблицу C.1</b> . Может получиться, что точки на этом графике не лягут на прямую, тем не менее прямую надо провести в любом случае.     | 1pt   |
| <b>C.3</b> | Определите степень $b$ и оцените погрешность измерения.  | 1.4pt |