跳动的珠子—相变和不稳定性的模型（10 分）

在开始进行本实验之前，请认真阅读在另外一个单独信封里装着的“实验考试总指南”。

引言

在日常生活中，相变经常可见。比如，水具有固态、液态和气态。这些不同的态可以通过相变来区分，不同状态下，材料中分子的集体行为将会改变。相变总是与转变温度相关，在转变温度时产生相变，比如，水的结冰温度和汽化温度。

其实，相变在很多系统中很广泛地发生着，如磁体在转变温度下，宏观状态从顺磁铁转化成铁磁态；又比如，在超导体在转变温度下，从常规导体转化为超导态。

所有这些相变现象，在通常情况下，都可以通过引入一个所谓的有序参数来进行描述。例如，在磁铁中，有序参数与原子磁矩的排列相关，而磁矩的排列决定了宏观的磁性。

在所谓的连续相变过程中，在临界温度以上，有序参数总是等于 0。在临界温度以下，随着温度的降低，有序参数逐渐连续的增大，图 1 给出了磁铁的有序参数随温度变化的情况。图中也给出了磁铁的微观有序度和无序度：在铁磁态下，所有磁矩是一顺排列的，这导致了宏观的磁性；而在顺磁态下，磁矩是随意取向的，导致了其宏观磁性为零。

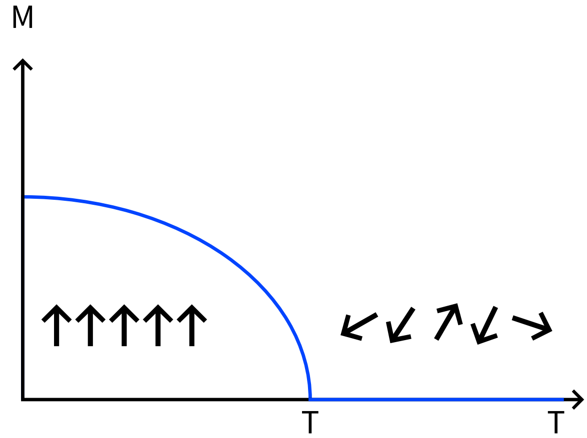

图 1，在相变过程中，有序参数 M 随着温度的变化。在临界温度 Tcrit 以下，有序参数不再为 0，而是随着温度降低而增加；而在临界温度 Tcrit 以上，有序参数为 0。

在连续相变中，靠近相变时的有序参数满足一个幂函数关系，如：在临界温度 T_{crit} 以下，磁铁的磁化强度 M（有序参数）满足下式：

$$M \begin{cases} \sim (T_{\mathrm{crit}} - T)^b, & T < T_{\mathrm{crit}} \\ = 0, & T > T_{\mathrm{crit}} \end{cases} \tag{1}$$

式中，T 为温度。更令人惊讶的是，这个幂函数规律是一个普遍规律，幂函数公式在很多相变中都适用。

实验任务

我们通过一个易于观察的简单例子来研究连续相变的一些特性，例如不稳定性是如何影响微观粒子（珠子）的集体行为的，进而是如何影响相变的，以及宏观变化是如何依赖于微观粒子的激发的。

在通常的相变中，相变是由温度激发的。在我们的例子中，这种激发来自于扬声器提供给粒子加速振动的动能。对应于相变的宏观变化现象是我们将要研究的内容，实验中是将珠子放进圆柱体中的两分隔部分之一，圆柱体中有一个小隔板将其平分成两部分。

珠子目前分布在柱体中的两分隔部分之一，增加扬声器的振动幅度，你会发现，最终珠子均匀地分布在两个分隔部分中。这表明，已经加热到临界温度以上。

你的实验目的就是：确定相变模型中的临界指数。

材料列表

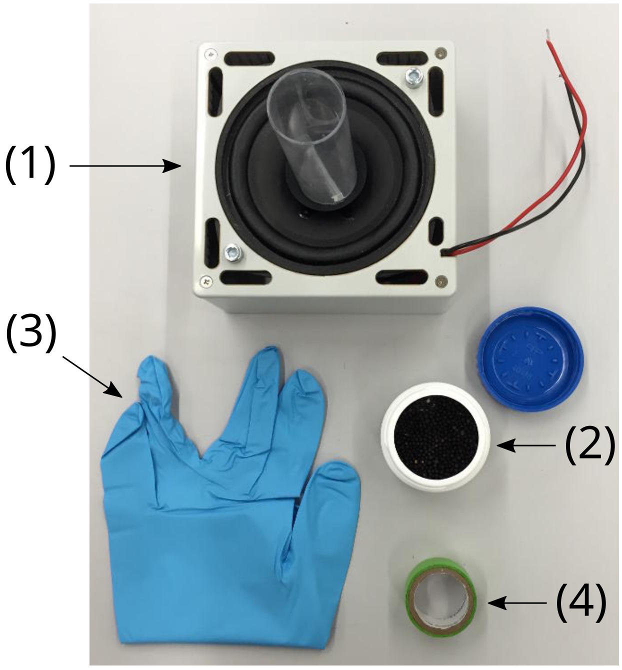

图 2 本实验还需使用的元件

1. 扬声器，其顶端装有一个圆柱状塑料管
2. 大约 100 粒珠子（装在塑料盒子中）
3. 手套
4. 胶带

重要预防措施

- 对安装在扬声器上的塑料管，请勿施加多余的侧压。注意，扬声器上的膜撕裂或者扯下塑料管，将没有替代品可提供

- 不使用时，关闭扬声器的电源，以免电池产生不必要消耗。
- 在本实验中，一个 4Hz 锯齿状信号输出到扬声器引线，该引线连接到信号发生器侧面。
- 锯齿信号的幅度可以通过右边的可变电阻器进行调整，可变电阻器标记有扬声器振幅【speaker amplitude（4）】。一个正比于信号振幅的直流电压输出到扬声器的振幅监控插口（6）（相对于接地插口 GND（7）。括弧中的数字指的是实验考试总指南中的照片。
- 扬声器上的膜是很精细的，确保其上没有不需要的压力，包括垂直的和侧向的压力。

A 部分- 临界激发振幅（3.3 分）

在开始做本题实验前，将扬声器引线连接到信号发生器上的侧面（保证连接的极性正确）。把一些（例如 50 粒）珠子放在固定在扬声器上的圆柱塑料管内，并用从手套切下的一块塑料膜封闭圆柱管顶部，保证珠子保持在圆柱管内。打开开关，用提供的螺丝起子转动右边标记为“扬声器振幅”（4）的可变电阻器，以调整振幅。在不同的振幅，观察珠子的分布情况。

第一个任务是确定出相变的临界激发振幅。为此，你必须确定两分隔部分的珠子数目 N_1 和 N_2（设 $N_1 \leq N_2$），它们为振幅的 A_D 函数，即是在扬声器振幅插口 (6) 测量到的电压。这个电压正比于驱动扬声器的锯齿信号的振幅。

为了使你研究的珠子总处在运动状态，只研究对应于扬声器振幅电压超过 0.7V 情况下的振幅。

- 开始时不用对珠子计数，缓慢改变电压，观察实验现象。由于静电原因，可能会有一些珠子粘在塑料管的底部。

A.1	改变振幅 A_D，多次测量容器两分隔部分的珠子数 N_1 和 N_2，记录在表 A.1 中。	1.2pt

A.2	计算多次测量值 N_1 和 N_2 的标准偏差，并将结果写在**表 A.1 中**。在**图 A.2 中**，画出 N_1 和 N_2 与 A_D（作为所显示的振幅）的函数关系图，图中要包括所有数据点的不确定度。	1.1pt

A.3	根据你作出的图，确定临界显示振幅 $A_{D,\mathrm{crit}}$，此时 $N_1 = N_2$，达到稳定的状态。	1pt

B 部分-校准（3.2 分）

显示振幅 A_D 对应施加于在扬声器上的电压。然而，扬声器振动的最大移动距离 A 才是我们真正感兴趣的物理量，因为它和珠子的激发有多强有关。因此，你必须对显示振幅与对应的激发振幅进行校定。出于这个目的，你可以所提供的任何材料及工具。

B.1	画出你用来测量激发振幅的实验装置示意图，这里激发振幅为一个周期内扬声器的最大移动距离 A（以 mm 表示）	0.5pt

B.2	测出激发振幅 A（以 mm 表示），保留适当的小数位，在**表 B.2** 记录下激发振幅 A 和显示振幅 A_D 的值，最后标示出不确定度。	0.8pt

B.3	将你的数据画在图 B.3 中，包括所有数据的不确定度。	1.0pt

B.4	利用作出的曲线，通过适当的拟合确定校定 $A(A_D)$ 函数关系中的参数。	0.8pt

B.5	确定珠子的临界激发振幅 A_{crit}。	0.1pt

在我们的系统中，温度与输入的激发动能相对应。这个能量正比于扬声器速度的平方，即，$v^2 = A^2 f^2$，其中 f

是振荡频率。现在，我们将验证这种依赖关系，并且确定有序参数行为的幂函数关系式中的幂指数 b。(见公式 1)

C.1	非平衡量 $\left\|\frac{N_1-N_2}{N_1+N_2}\right\|$ 是描述我们系统的一个很好的有序参数。因为在临界振幅以上，其值为 0，在低激发振幅下其值等于 1 。计算这个有序参数，它是激发振幅 A 的函数。将各个物理量的结果填入表 **C.1**.	1.1pt

C.2	在图 **C.2 中，用**双对数坐标，画出非平衡量 $\left\|\frac{N_1-N_2}{N_1+N_2}\right\|$ 随 $\left\|A_{\text{crit}}^2-A^2\right\|$ 参数变化的关系线。使用表 C.1 中的数据进行计算。图中的数据似乎不满足线性关系，但是可以通过线性回归，以便与临界指数公式相匹配。	1pt

C.3	确定出指数 b 并估计误差。	1.4pt