

# 虚拟仿真实验

邵一陆

(复旦大学物理学系 18307130023)

**摘要：**本次实验完成了国家虚拟仿真实验教学课程共享平台 <http://www.ilab-x.com> 上的两个实验：“核衰变及高速带电粒子能量动量测量”和“热力学与气体动理论虚拟仿真实验”。

## 核衰变及高速带电粒子能量动量测量

### 一、实验原理

1. 磁谱仪的工作原理是带电荷数为 $q$ ,质量为 $m$ 的粒子(贝塔射线,即高能电子束)以速度 $v_0$ 垂直入射到加有均匀磁场 $B$ 的真空腔室中,在洛伦兹力的作用下,带电粒子会作半径为 $R$ 的匀速圆周运动,即:

$$F = q v_0 B = \frac{m v_0^2}{R}$$

由于带电粒子入射方向与腔室边界垂直,其在真空腔内的运动轨迹为一完整的半圆,则:

$$R = \frac{\Delta X}{2}$$

由此可通过测量粒子在真空腔中偏转的距离 $\Delta X$ 来计算得到粒子的动量 $p$ :

$$p_0 = m v_0 = \frac{q B \Delta X}{2}$$

2. 相对论能动关系为 $E_k = E - E_0 = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2$

### 二、实验步骤

1. 在真空条件下,将放射源设置为  $^{90}\text{Sr}$ ,设置其出射方向为+y,测量电子击中探测器位置在 x 分量上的统计分布,通过程序中数据处理模块初步检验实验结果合理性。
2. 下载实验结果数据文件,由关系式 $p = \frac{e B \Delta X}{2}$ 得到粒子的动量分布,由得到的 $E_2$ 根据能损表格查得 $E_1$ ,画出 $E_1 \sim p$ 关系图。
3. 计算 $\Delta E$ ,画出 $\Delta E \sim E_1$ 关系图,计算能量损耗期望值。

### 三、实验数据

1. 电子在 x 分量上的统计分布  
以步长为 1, 将统计数据绘制为直方图。

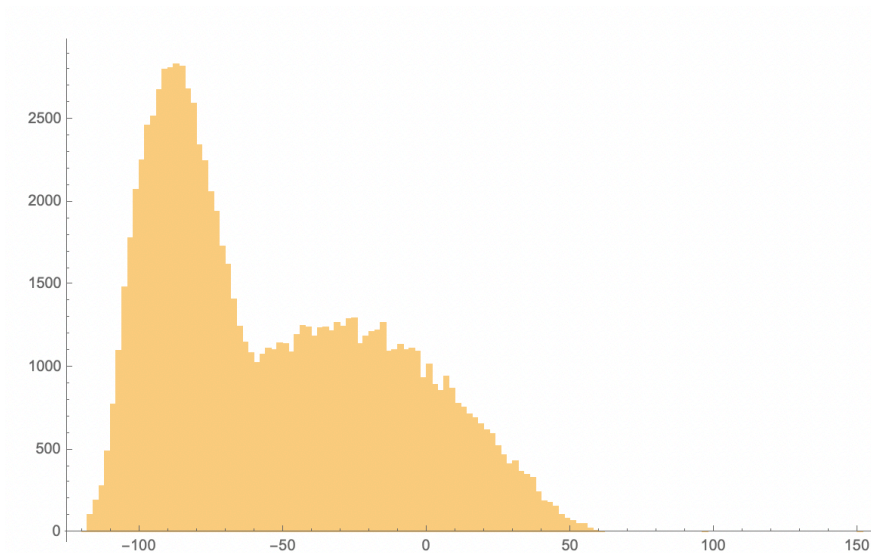


图 1:电子位置分布直方图 (横轴单位: mm, 纵轴单位: 次)  
与理论预期相符合。

2. 电子的动量分布与能动关系的验证

粒子源出射位置为-12cm, 提取E1, E2数据并作图:



图 2:电子能量分布直方图 (横轴单位: MeV, 纵轴单位: 次)  
黄色为穿过铝膜前, 蓝色为穿过铝膜后的能量分布。根据相对论能动关系进行计算得到下图蓝线:

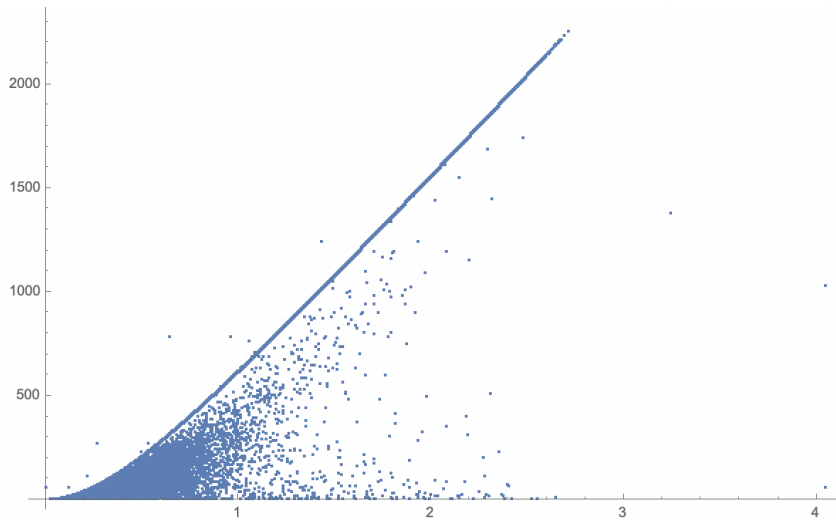


图 3:质能关系图 (横轴单位:  $\text{pc/MeV}$ , 纵轴单位:  $\text{MeV}$ )

可以看到绝大多数的点都落在相对论质能关系的一侧, 因此验证了相对论质能关系的正确性。

### 3. $\Delta E \sim E1$ 关系图

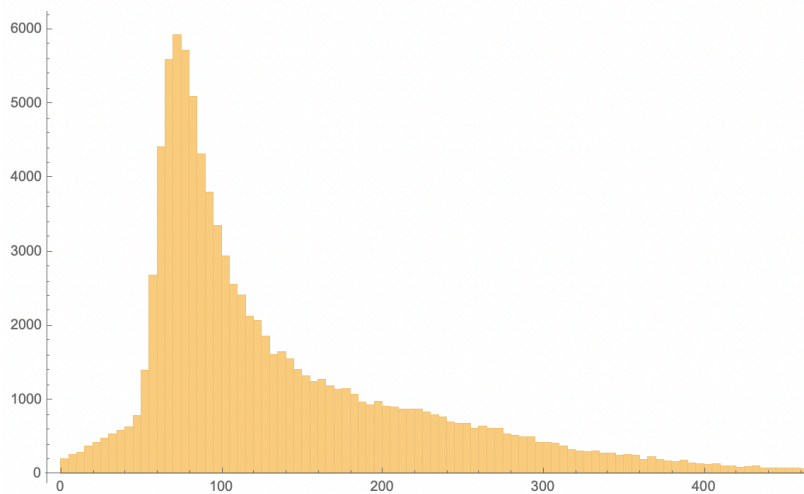


图 4:能量损耗分布图 (横轴单位:  $\text{MeV}$ , 纵轴单位: 次)

能量损耗期望值  $\overline{\Delta E} = 142.33 \text{MeV}$ 。  $\Delta E \sim E1$ 关系图如下:

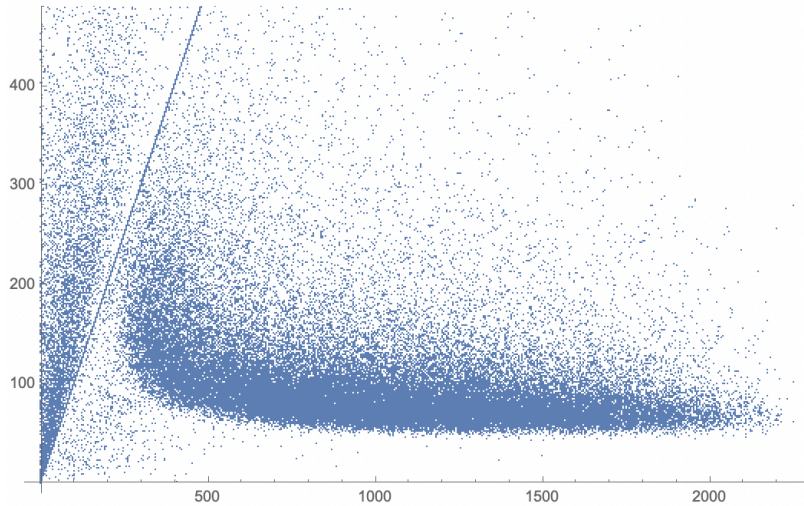
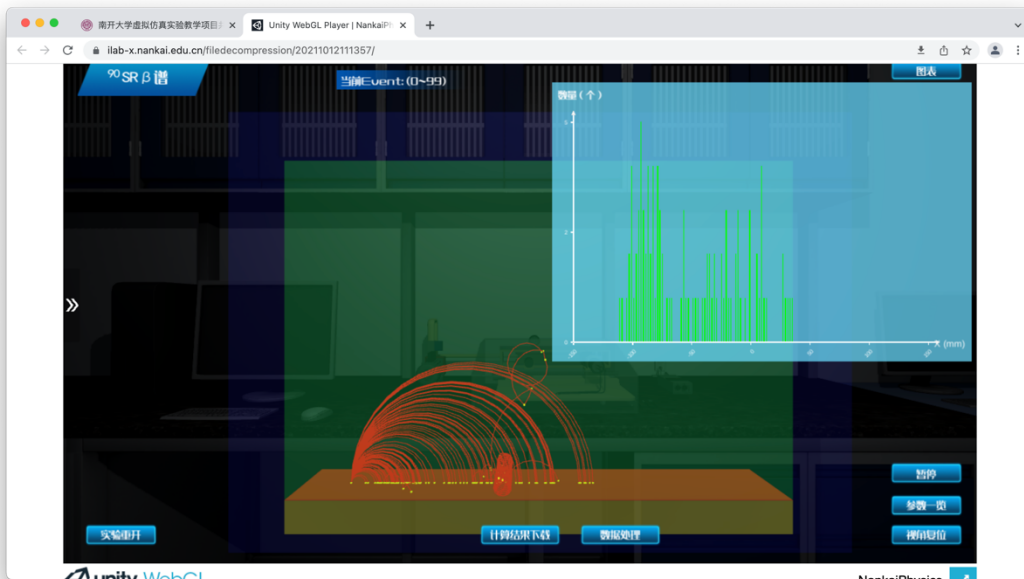


图 5:  $\Delta E \sim E1$ 关系图 (横轴单位: MeV, 纵轴单位: MeV)

可以看到铝膜对于特定动量的电子有较为明显的吸收关系。

#### 四、实验结论

本实验利用磁谱仪测量了  $^{90}\text{Sr}$  衰变产生的贝塔射线, 测定了电子能量动量关系, 并验证了相对论能动关系。



## 热力学与气体动理论仿真实验

### 一、实验原理

热学的研究对象是大量微观粒子 (分子) 组成的系统, 每个分子的运动都满足牛顿运动定律, 分子通过相互碰撞交换动量使系统达到热力学平衡, 系统的宏观性质决定于对微观运动参量的统计。本实验采用分子动力学模拟方法, 数值求解大量分子的牛顿运动学方程, 再通过数值统计求得系统宏观性质。

### 二、实验步骤

1. 理想气体平衡态的气体动理论解释
  - a. 处于平衡态的系统宏观性质的统计求解: 温度、压强
  - b. 麦克斯韦速率分布率的计算、统计方法和虚拟仿真

验证

2. 绝热自由膨胀实验 (焦耳实验) 的动力学特性 a.焦耳实验的虚拟仿真建模 b.理想气体绝热自由膨胀过程的分子扩散 c.理想气体温度与分子运动参量的关系
3. 准静态过程 a.热力学过程中准静态过程的微观机制 b. 实现并定量检验准静态过程
4. 布朗运动与爱因斯坦关系 a.布朗运动的微观机制 b. 爱因斯坦关系的微观验证 c.宏观参量扩散系数的虚拟仿真测量
5. 麦克斯韦妖 a. 热力学第二定律 b. 麦克斯韦妖思想实验的虚拟仿真建模

### 三、实验现象与数据

#### 1. 平衡态统计

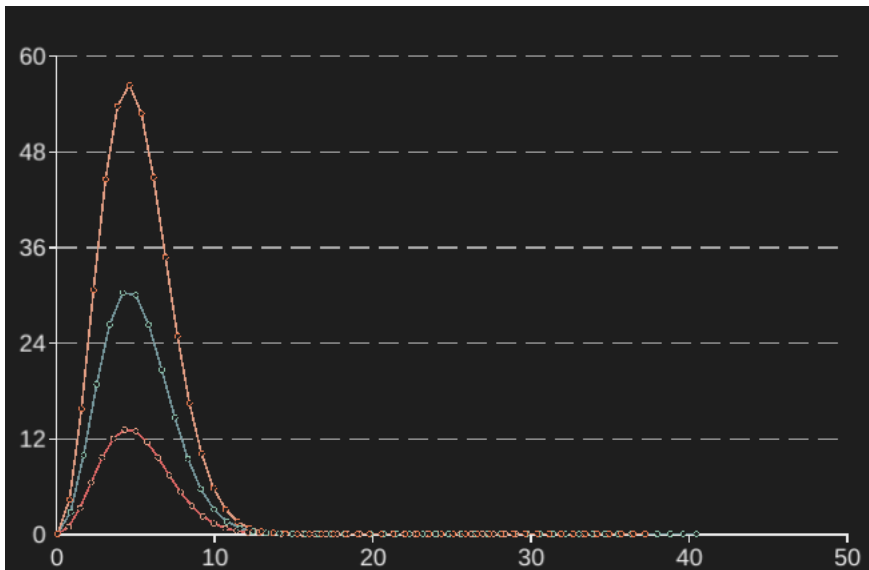


图 1:温度相同不同粒子数的速率分布 (横轴为速率 m/s, 纵轴为粒子数, 下同) 温度相同时, 粒子数最概然分布不变。

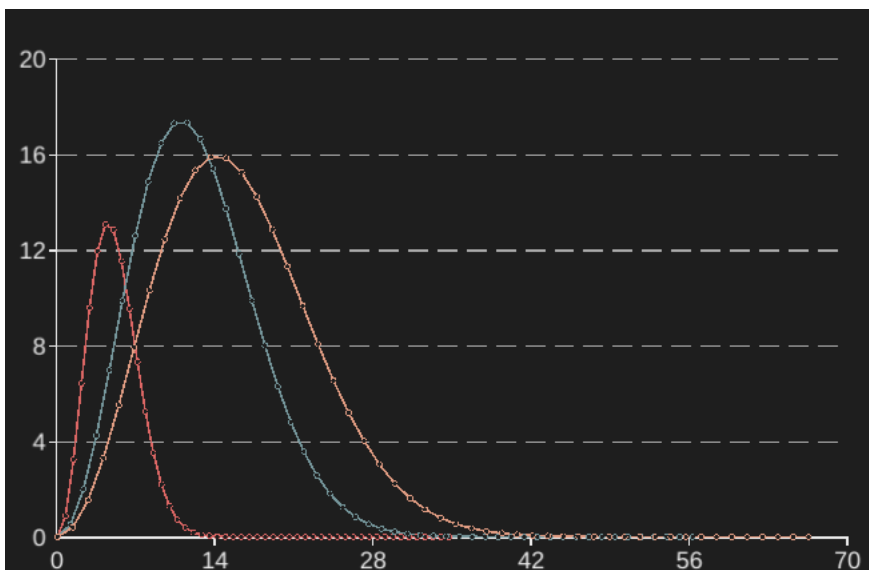


图 2:10, 60, 100 摄氏度时粒子数的速率分布 温度越大, 分子最概然速率越大。

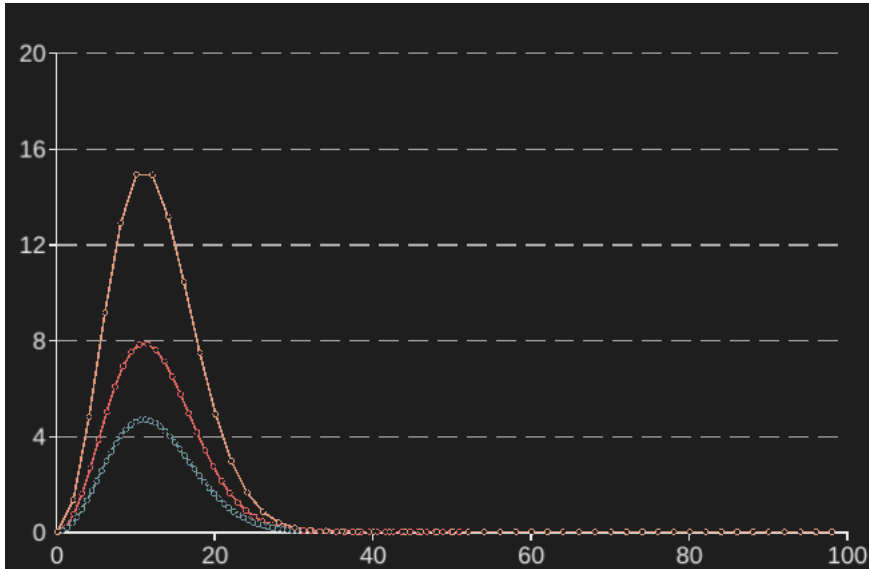


图 3:半径不同的粒子数的速率分布

粒子半径对最概然速率无影响，但是由于粒子体积变大在实验中粒子数减少。

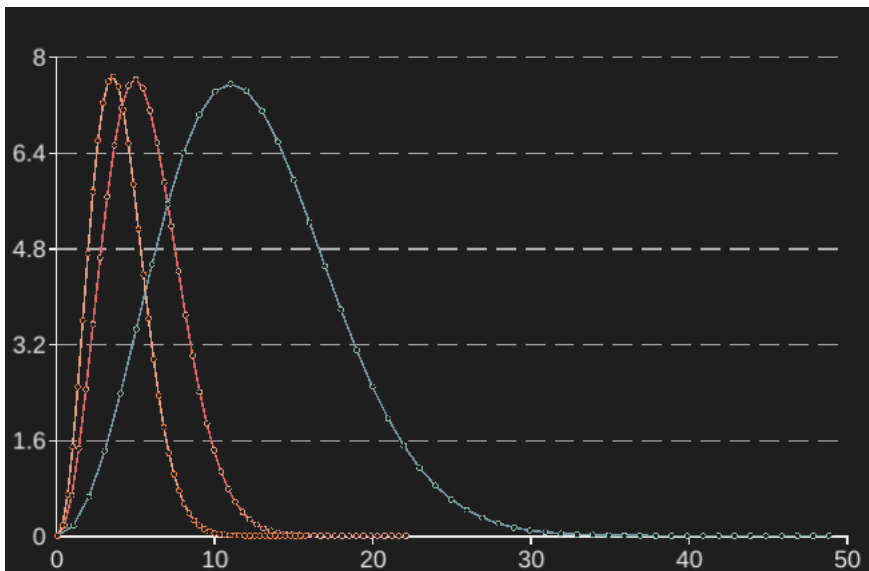


图 4:质量不同的粒子数的速率分布

质量越大，粒子最概然速率越小。

## 2. 准静态压缩

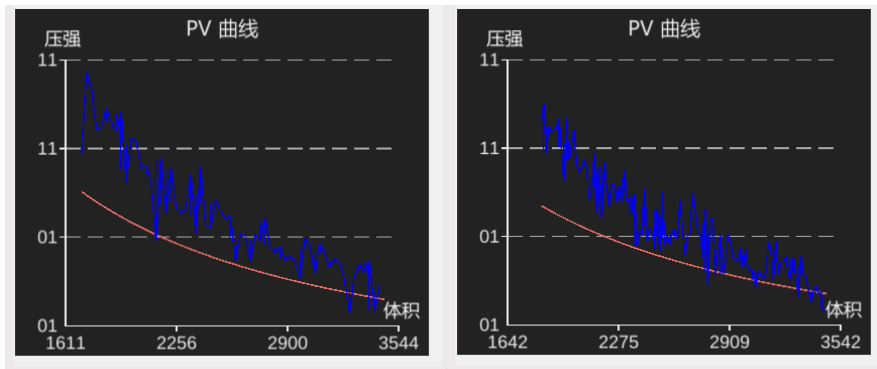


图 5: 气体压缩的 P-V 曲线 (左: 压缩速度为 0.2m/s, 右: 压缩速度为 0.05m/s)

压缩速度越慢，气体行为偏离理想气体的程度越小。

### 3. 气体自由膨胀

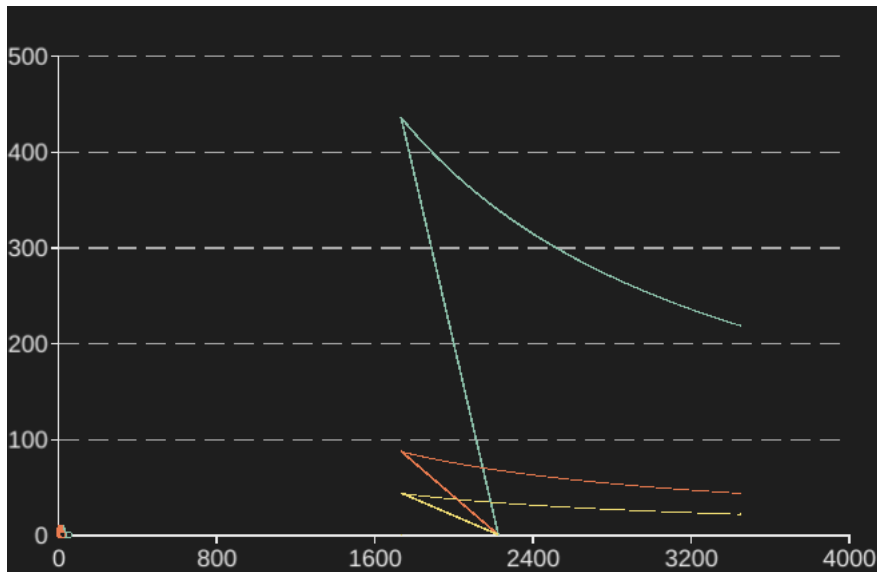


图 5:绝热自由膨胀与粒子质量关系 (P/KPa-V/mL)

粒子质量越大，P-V 图线斜率越小弛豫时间越长，系统达到平衡速度越慢。

### 4. 布朗运动的观察

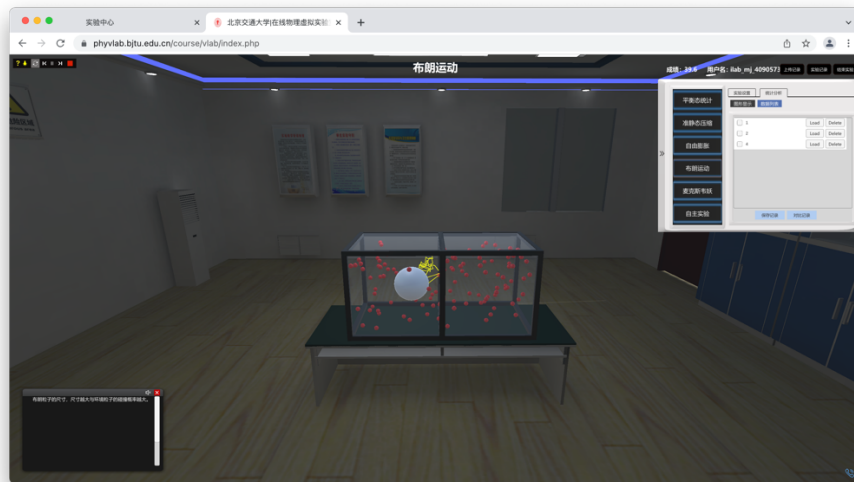


图 6: 观察布朗运动

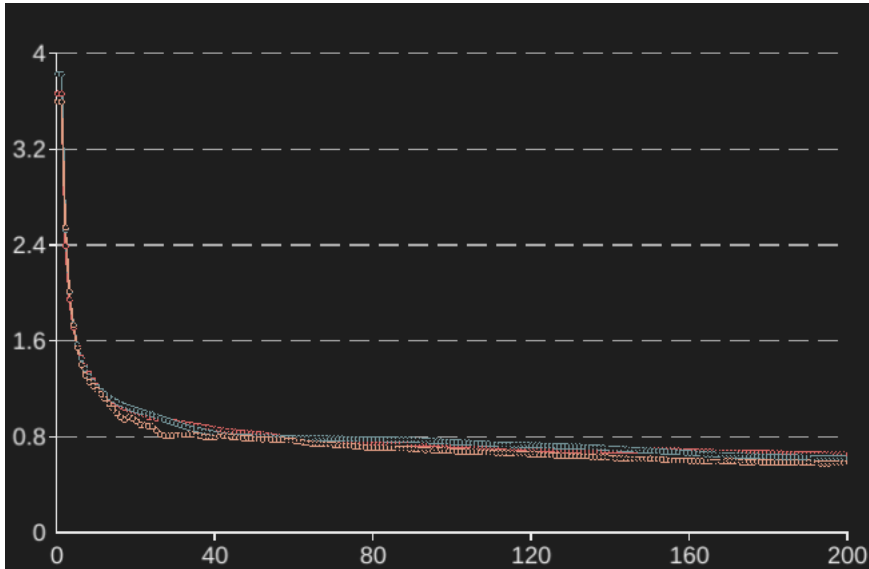


图 7: 不同半径的布朗粒子的 MSD 曲线

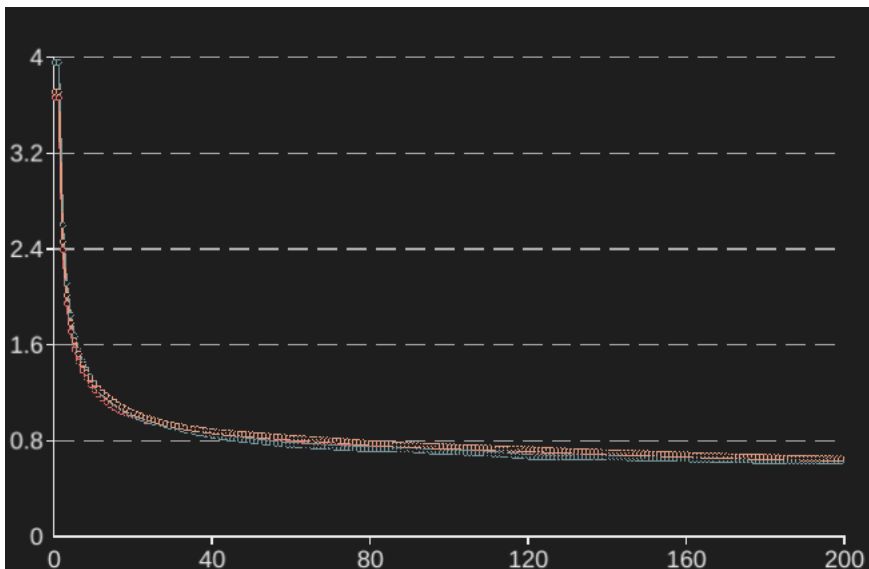


图 7: 不同质量的布朗粒子的 MSD 曲线

如图所示，粒子质量越大或半径越大，扩散系数越小，布朗效应越不明显。

### 5. 麦克斯韦妖

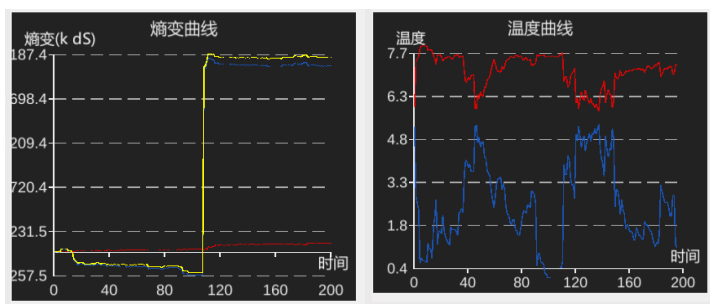


图 8: 放了麦克斯韦妖的箱子

发现熵变可以为负。

### 四、实验结论



本实验利用分子动力学模拟，验证了平衡态统计的结论，并对准静态过程、绝热膨胀、布朗运动等动理学现象做了研究。