

虚拟仿真实验

郭家祺

(复旦大学 上海市 200437)

本次实验完成了[国家虚拟仿真实验教学课程共享平台](#)中的“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”实验。

1. 核衰变及高速带电粒子能量动量测量

1.1. 实验原理

1.1.1. β 磁谱仪

β 磁谱仪的工作原理是带电荷数为 q ，质量为 m 的粒子（此处为 β 射线）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：

$$F = q_0 B = \frac{mv_0^2}{R}.$$

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 ΔX 来计算得到粒子的动量 p ：

$$p_0 = mv_0 = \frac{qB\Delta X}{2}.$$

1.1.2. 相对论动能关系

洛伦兹变换下，静止质量为 m_0 ，速度为 v 的物体，狭义相对论定义的动量 p 为：

$$p = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}v = mv$$

式中 $\beta = v/c$ 。相对论的能量 E 为：

$$E = mc^2$$

这就是著名的质能关系方程，当物体静止时 $v = 0$ ，物体的静止能量为 $E_0 = m_0c^2$ ，则物体的动能为：

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right).$$

当 $\beta \ll 1$ ，即当物体速度较低时物体的动能为：

$$E_{k0} = \frac{1}{2}m_0v^2 = \frac{p_0^2}{2m_0}.$$

此即经典力学中的动能-动量关系。由此

$$E^2 - c^2p^2 = E_0^2,$$

则动能和动量的相对论关系为：

$$E_k = E - E_0 = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2.$$

在实际仪器测量中，只能得到穿过铝膜探测窗后粒子的能量 E_2 ，粒子在穿过铝膜时会有能量损失 ΔE ，而粒子在铝膜前的能量 $E_1 = E_2 + \Delta E$ ，本实验中最后需要得到的关系是粒子膜前能量 E_1 与动量 p 的关系。

1.2. 实验步骤

- 在真空条件下，将放射源设置为 ^{90}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。
- 下载实验结果数据文件，由关系式 $p = eB\Delta X/2$ 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。
- 计算 ΔE ，画出 $\Delta E \sim E_1$ 关系图，计算能量损耗期望值。

1.3. 实验数据

1.3.1. 电子在 x 分量上的统计分布

绘制位置分布直方图，组距为1，如图1所示：

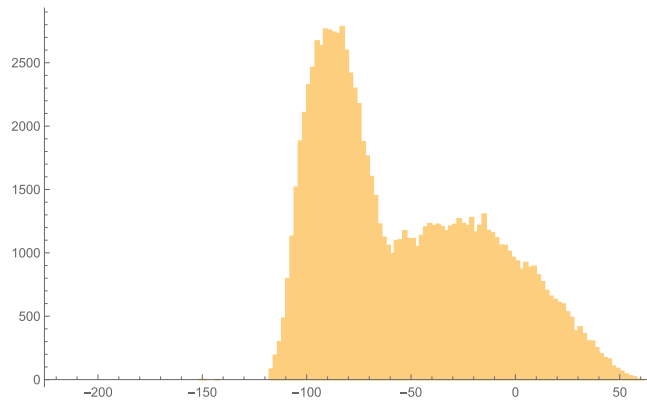


图 1: 电子位置分布直方图（横轴单位：mm，纵轴单位：次）

可见有数据点小于-120（初始位置），去除小于-120的点再画图：

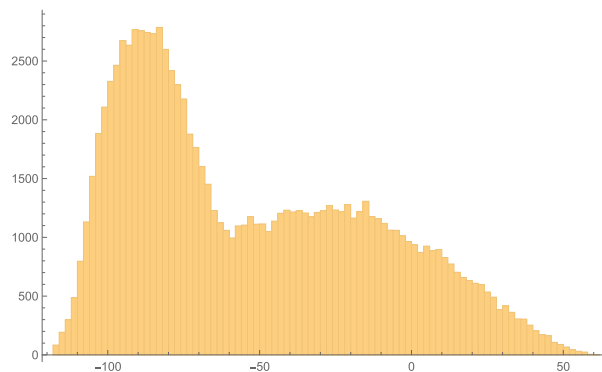


图 2: 去除坏点后的电子位置分布直方图（横轴单位：mm，纵轴单位：次）

可见该图与理论预期的结果符合。

1.3.2. 电子的动量分布与能动关系的验证

粒子源出射位置为-12 cm，提取 E_1, E_2 数据并作图：

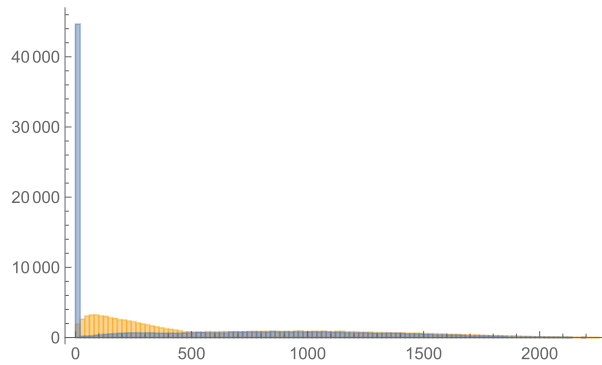


图 3: 电子能量分布直方图（横轴单位：MeV，纵轴单位：次）

黄色为穿过铝膜前的能量 E_1 ，蓝色为穿过铝膜后的能量 E_2 分布。可以发现，小于一定动量的电子未穿过铝膜，而穿过铝膜的电子能量与穿过前的分布图样大致一致。

根据相对论动能关系计算出电子动量，可以做出 $E_1 - p$ 的关系图：

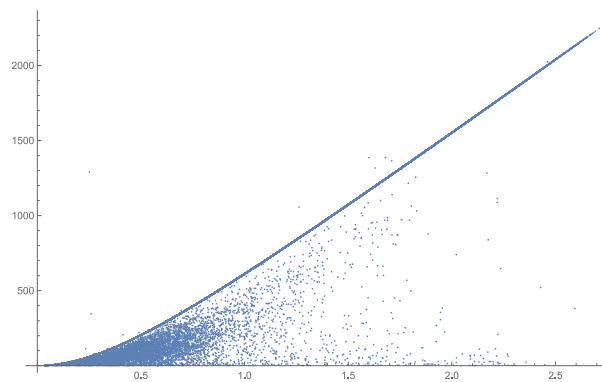


图 4: 质能关系图（横轴单位： pc/MeV ，纵轴单位：MeV）

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

1.3.3. $\Delta E \sim E_1$ 关系

首先统计 ΔE 的频率分布，我们发现

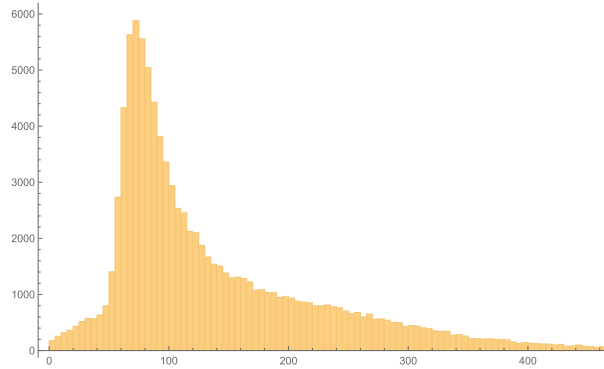


图 5: 能量损耗分布图 (横轴单位: MeV, 纵轴单位: 次)

而 ΔE 与 E_1 的关系如下:

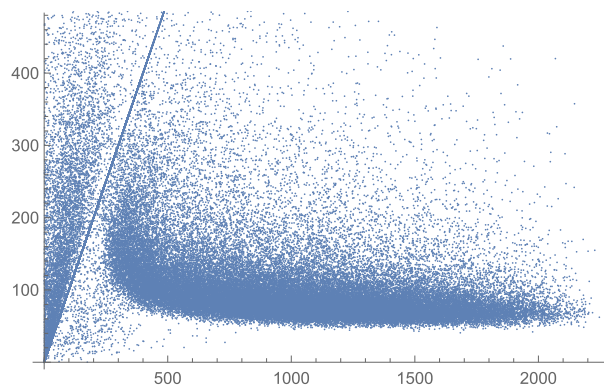


图 6: $\Delta E \sim E_1$ 关系图 (横轴单位: MeV, 纵轴单位: MeV)

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。

1.4. 实验结论

本实验利用磁谱仪测量了 ^{90}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。

2. 热力学与气体动理论仿真实验

2.1. 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。

2.2. 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. 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
- 5. 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
- 6. 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

2.3. 实验数据

2.3.1. 平衡态统计

平衡态下，总粒子数不同的情况下，速率分布图为：

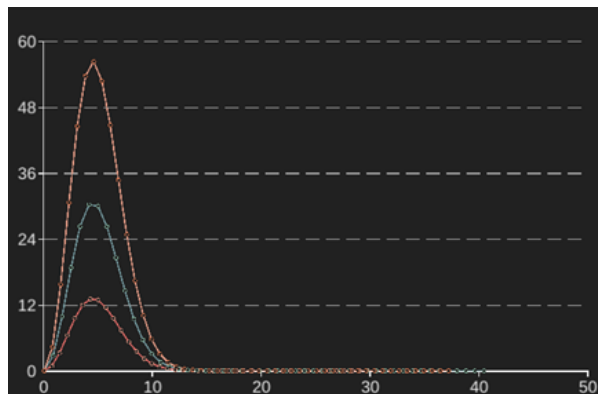


图 7: 相同温度下粒子的速率分布（横轴为速率m/s，纵轴为粒子数，下同）

如果改变温度，会发现随着温度上升，分子最概然速率会变大：

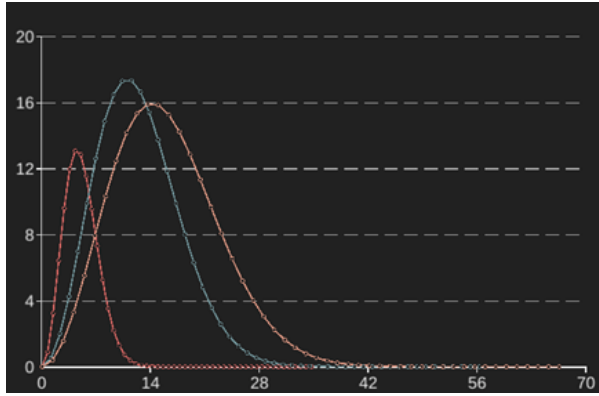


图 8: 10, 60, 100摄氏度时粒子数的速率分布

如果考虑粒子半径, 会发现它对最概然速率无影响, 但是由于粒子体积变大, 实验中粒子数减少, 因此我们有

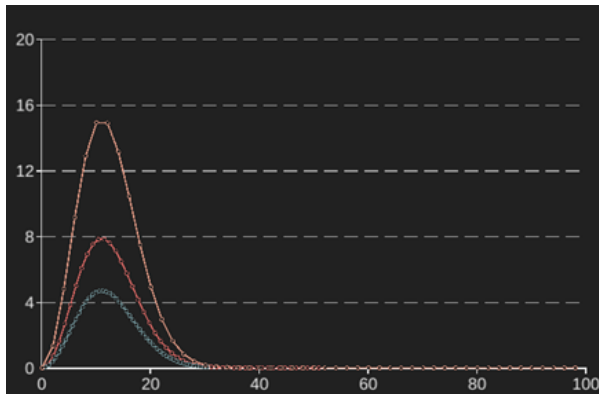


图 9: 半径不同的粒子数的速率分布

考虑质量, 会发现质量越大, 粒子的最概然速率会越小

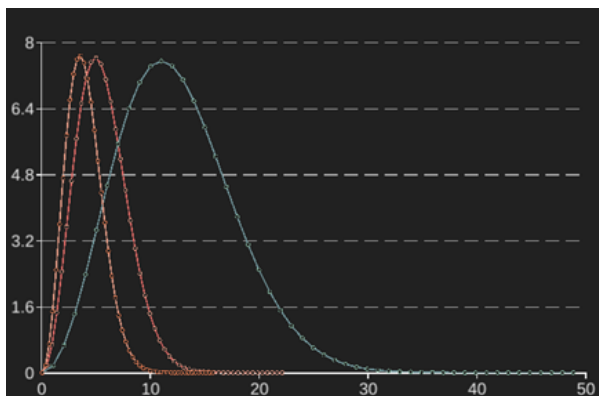


图 10: 质量不同的粒子数的速率分布

2.3.2. 准静态压缩

在准静态下压缩气体并做出P-V图, 可以发现压缩速度越慢, 情况越接近准静态, 曲线与理想气体曲线也更近:

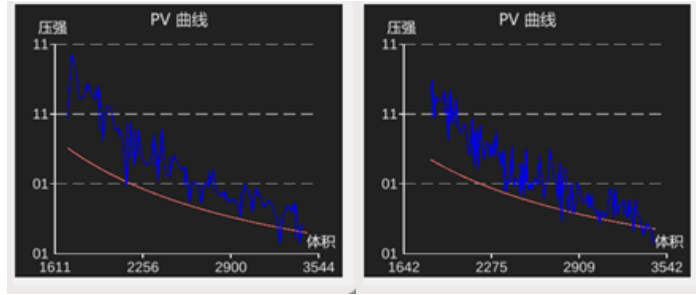


图 11: 气体压缩的P-V曲线 (左: 压缩速度为0.2m/s, 右: 压缩速度为0.05m/s)

2.3.3. 自由膨胀

考虑自由膨胀与粒子质量的关系并作图, 会发现粒子质量越大, P-V图线斜率越小, 弛豫时间越长, 系统达到平衡速度越慢。

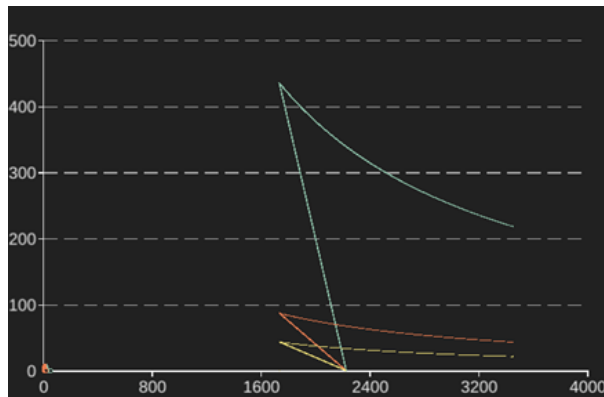


图 12: 绝热自由膨胀与粒子质量关系 (P/KPa-V/mL)

2.3.4. 布朗运动

考虑布朗运动的方均位移曲线, 绘制不同粒子半径或者质量的粒子的扩散系数, 会发现粒子质量或半径越大, 布朗效应约不明显:

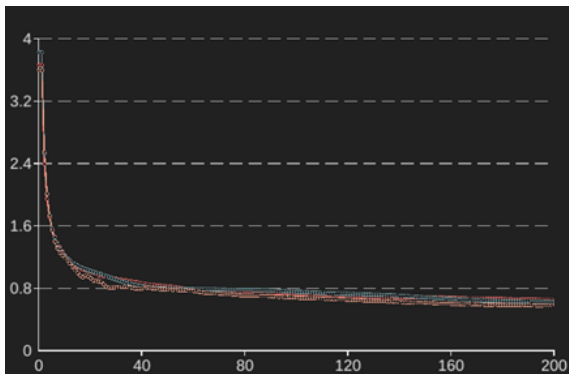


图 13: 不同半径的布朗粒子的MSD曲线

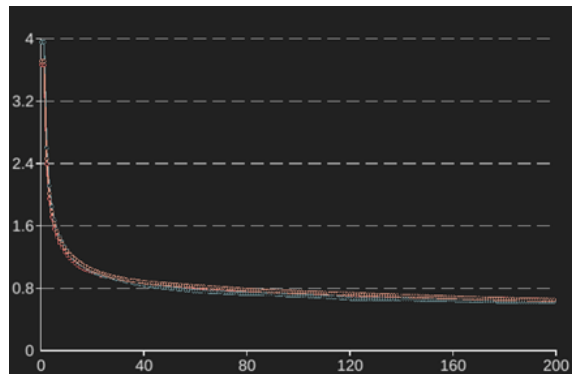


图 14: 不同质量的布朗粒子的MSD曲线

2.3.5. 麦克斯韦妖

考察放了麦克斯韦妖的盒子的熵变, 温度随时间的变化关系可以发现:

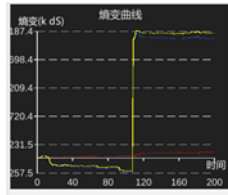


图 15: 熵变曲线

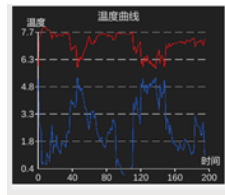


图 16: 温度曲线

即熵变可以为负数。

2.4. 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，同时研究了准静态过程，自由膨胀，布朗运动以及麦克斯韦妖等现象。