

密立根油滴实验

(理解电荷量子化，用实验手段使微观现象可视化)

一、课前预习

(一) 预习要点

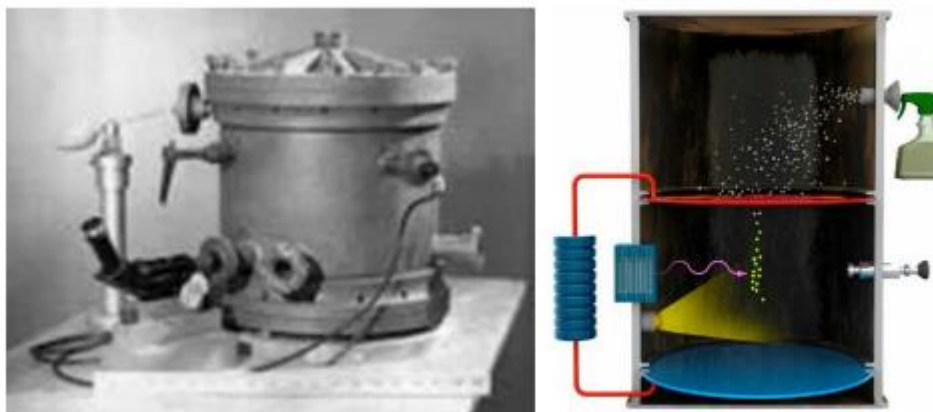
1. 密立根油滴实验在物理学发展史上有什么重要意义？
2. 如何选择合适的油滴，合适的油滴标准是什么？
3. 不同油滴界定标准是什么，与电荷量子化有什么关系？
4. 静态法和动态法测油滴的优缺点是什么？

(二) 预习资源

1. 中心网站 《大学物理实验》慕课
2. 智慧树 《大学物理实验》慕课
3. 大学物理实验虚拟仿真实验平台

二、背景及应用介绍

电子作为基本粒子之一，是原子的组成部分。1910年，罗伯特·安德鲁·密立根设计了油滴实验方法，发现任何带电体所携带的电量为基本电荷的整数倍，精确地测量了电子电荷，揭示了电子电荷是量子化的。密立根采用的方法主要是使油滴自身的重力与受到的电场力平衡，这样油滴悬浮于两金属电极之间，然后根据电场强度计算出油滴所携带的总电荷量。对大量油滴进行测试之后，发现所有油滴的总电荷值都为同一数字的倍数，对它们取最大公约数后得到了单个电子所带的电荷。



密立根油滴法的实验装置和内部构造示意图

本实验属于综合性实验，图显示了密立根油滴法的实验装置，从内部构造示意图中可以看出，电极是由两块金属板以水平方式平行排列构成，两个电极之间可以具有很大的电势差。油滴与喷嘴摩擦而获得电荷，然后通过上金属板中心圆孔进入两电极之间。装置侧面的绝缘部分开有圆孔，可以引入光线照明，另外一侧有显微镜用来观测油滴的运动。

三、实验目的

1. 在知识方面：

（1）掌握密立根油滴法测定电子电荷的基本原理，观察带电油滴在重力场及电场中的运动规律；

（2）选取合适的油滴，测定它所带的电荷值 q 理解电视显微成像放大的基本原理；

（3）求出电子电荷值 e ，并与公认值比较，验证电荷是量子化的。

2. 在能力方面：

（1）培养学生的近代物理实验能力；

（2）培养学生动手操作、发现问题、分析问题和解决问题能力；

（3）培养学生分析处理实验数据和误差分析的能力。

3. 在素养方面：

（1）培养学生的科学实验素养；

（2）培养学生正确的价值观；

（3）主动探究的创新精神。

四、教学中的重点与难点

重点

1. 由于实验中只测量 5 个油滴所带的电量，不能用取最大公约数的方法计算电子电荷，所以需要让学生理解本次实验是验证密立根油滴法的实验结果，利用公认的电子电荷进行“倒过来”方法验证。

2. 让学生练习操控油滴的方法，包括用喷雾器注入油滴，改变电压驱散不需要的油滴，控制合适的油滴在电场中平衡，使油滴竖直下落等。

难点

准确测量上升和下落时间是本实验的难点，必须考虑仪器和实验操作者可能存在的各种偶然和系统因素。

五、实验原理

当油滴经喷雾器喷出时，细微的油滴由于摩擦一般都已带电。如果将一质量为 m 、所带电量为 q 的油滴引入到图 2 所示的电场中，油滴将同时受到重力 mg 和电场力 qE 的作用。油滴静止平衡时，电场力和重力方向相反、大小相等，即：

$$mg = q \frac{U_n}{d} \quad (1)$$

其中 U_n 为平衡电压， d 为平行板间距。这样可以求出油滴所带电量：

$$q = mg \frac{d}{U_n}$$

实验证明，改变油滴的带电量，只能是一些不连续的特定电压值才能使油滴平衡。这说明电荷的量值是离散的，电荷存在最小的基本单元 e ，即

$$q = ne(n = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

由于油滴的质量很小，很难直接测量。油滴在表面张力作用下一般呈球状，所以油滴的质量：实验中测出电荷值的最大公约数即为电子电荷 e 。

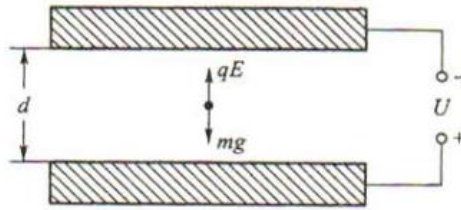


图 1 平行平板电场中的油滴

由于油滴的质量很小，很难直接测量。油滴在表面张力作用下一般呈球状，油滴的质量：

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho$$

其中 ρ 为油滴的密度， a 为油滴的半径。

当平行极板上的电压 $U = 0$ 时，油滴受重力的作用而加速下落。由于空气阻力的作用，下落很小一段距离后，油滴将作匀速运动，速度为 v ，这时重力与空气黏滞阻力 F_r 平衡（空气浮力忽略不计），可以得到：

$$F_r = mg \quad (2)$$

根据斯托克斯定律，黏滞阻力 $F_r = 6\pi a \eta v$ ，故有

$$6\pi a \eta v = mg \quad (3)$$

式中， η 表示空气黏滞系数； a 表示油滴半径。

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}} \quad (4)$$

由于油滴非常小，空气已不能看成连续的介质，而斯托克斯定律只适用于连续的介质，所以空气的黏滞系数 η 应修正为

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (5)$$

式中， b 表示修正常数； p 表示为空气压强； a 表示未经修正的油滴半径，由于它在修正项中，不必计算得很精确，由式（3）计算就够了。

实验时，当两极板间电压 $U=0$ 时，设油滴匀速下落的距离为 l ，时间为 t ，则

$$v = \frac{l}{t} \quad (6)$$

将式（3）、式（4）、式（5）代入式（1）， η' 代替式（3）中的 η ，可得

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t(1 + \frac{b}{pa})} \right]^{3/2} \frac{d}{U} \quad (7)$$

上式即为静态（平衡）法测油滴电荷的公式。

对实验测得的各个电荷 q_i 求最大公约数，就是基本电荷 e 的值。若求最大公约数有困难，可用作图法求 e 值。

实验所需的参数如下：

油的密度： $\rho=981 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ （20℃）；重力加速度： $g=9.80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ；空气黏度： $\eta=1.83\times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ；修正常数： $b=8.22\times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{Pa}$ ；大气压强： $p=1.013\times 10^5 \text{ Pa}$ ；平行极板间距离： $d=5.00\times 10^{-3} \text{ m}$ 。

六、实验内容

1. 观察带电油滴自由下落及在电场中的运动规律。练习选择、控制油滴的技巧。油滴两秒钟不动即认为达到平衡。
2. 选择平衡电压在 200-300 伏左右，下落时间在 10-30 秒范围内的 5 个油滴，各重复测量 3 次。
3. 计算油滴所带电量 q 。
4. 计算基本电荷 e 。理论上对实验测得的各个电荷量 q_1 、 q_2 、 q_3 ……求最大公约数，则可得到电子电荷的值 e 。但由于实验误差的存在，而且实验过程中

仅测 5 个电荷，难以用这种方法求得 e 的数值。我们采用的方法是用公认的电子电荷值 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 去除 q ，它应该得到一个接近于某个整数值 n 的数值。 n 就是该油滴所带的基本电荷数，所测得的电子电荷 $e = q/n$ 。一般选择 $n < 10$ 的油滴。所以本次实验主要是验证密立根的实验方法。

5. 用五个油滴得到的电子电荷进行平均，将结果 e 与公认值 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 比较，分析误差的大小，做出适当的讨论。

6. 实验装置和操作过程：

主要包括油滴盒、CCD 电子显示显微镜、电源盒、喷雾器及其它辅助设备。

(1) 如图 2 所示，油滴盒中放置两块平行的金属圆电极板，上电极板中央有小孔，喷雾器喷出的油滴由小孔落入两极板的油滴区。极板旁安装了 LED 灯，可以照明油滴区，通过 CCD 电子显微镜，在监视器的屏幕上可以看到油滴像。

(2) CCD 电子显示显微镜由显微镜、CCD 盒、监视器组成。当油滴落入油滴区后，调节显微镜调焦手轮，使处于物镜焦平面附近的油滴通过显微镜，CCD 电子显示系统成像在监视器屏幕上，即可看到油滴亮点。监视器有四个旋钮，其中四个大格为 10 cm，相当于放大 50 倍。

(3) 如图 3 所示，电源盒包括可调直流稳压系统（提供平衡电压，输出电压为数百伏）、电子计时系统（测量油滴下落时间）。电源盒左下角是平衡、上升、下降的三档开关，通过调节电压控制油滴的运动。右部的时间控制键包括 Start/Stop 和 Reset 键，测量油滴的运动时间。

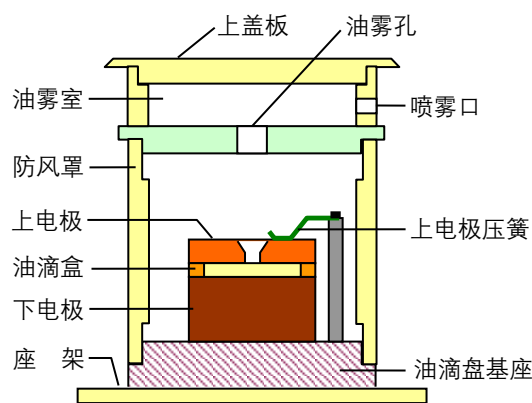


图 2 油滴盒

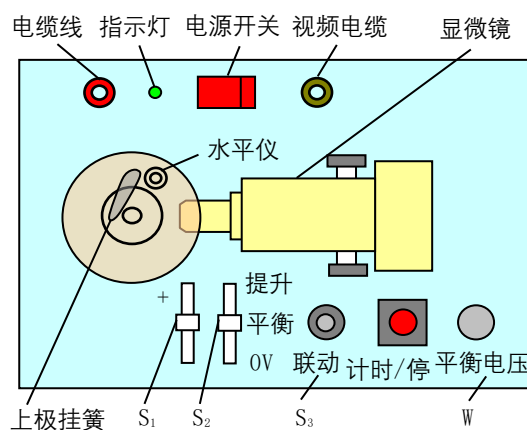


图 3 油滴仪面板

操作步骤：

1. 调节油滴仪底脚高度，用水准泡观察，以保证平行极板和重力方向垂直。
2. 打开油滴仪和监视器电源，监视器显示标准分划板刻度。

3. 用喷雾器从喷雾口喷入油滴，调节显微镜，使之在监视器屏幕上出现大批油滴像。功能控制开关处于中间位置（平衡），可用电压调节旋钮来调节平衡电压大小，使被测油滴处于平衡状态；处于上沿位置（升降），上、下电极增加 200 V 提升电压；处于下沿位置（测量），极板间电压为 0，被测油滴处于下落状态。油滴下落到预定位置时将其拨到中间（平衡）档，同时停止计时。

七、实验结果与分析

表 1 油滴的平衡电压和下落时间

油滴 i	U_i (V)	t_{i1} (s)	t_{i2} (s)	t_{i3} (s)	$\bar{t}_i$ (s)
1	247	13.9	14.5	13.5	13.97
2	197	21.6	21.9	22.2	21.90
3	224	17.3	17.4	17.1	17.27
4	219	17.1	17.3	17.0	17.13
5	291	26.7	26.4	27.3	26.80

(1) 第一个油滴

$$q_1 = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{\left[\bar{t}_1 (1 + 0.02 \sqrt{\bar{t}_1}) \right]^2} \cdot \frac{1}{U_1} = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{13.97 \times (1 + 0.02 \sqrt{13.97})^2} \cdot \frac{1}{247} = 9.951 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$n_1 = \frac{q_1}{e} = \frac{9.951 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 6.612 \approx 6$$

$$e_1 = \frac{q_1}{n_1} = \frac{9.951 \times 10^{-19}}{6} = 1.659 \times 10^{-19} \text{ C}$$

(2) 第二个油滴

$$q_1 = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{\left[\bar{t}_1 (1 + 0.02 \sqrt{\bar{t}_1}) \right]^2} \cdot \frac{1}{U_1} = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{21.09 \times (1 + 0.02 \sqrt{21.09})^2} \cdot \frac{1}{197} = 6.193 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$n_1 = \frac{q_1}{e} = \frac{6.193 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 3.866 \approx 4$$

$$e_1 = \frac{q_1}{n_1} = \frac{6.192 \times 10^{-19}}{4} = 1.548 \times 10^{-19} \text{ C}$$

(3) 第三个油滴

$$q_1 = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{\left[\bar{t}_1 (1 + 0.02 \sqrt{\bar{t}_1}) \right]^2} \cdot \frac{1}{U_1} = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{17.27 \times (1 + 0.02 \sqrt{17.27})^2} \cdot \frac{1}{224} = 7.891 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$n_1 = \frac{q_1}{e} = \frac{7.891 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 4.926 \approx 5$$

$$e_1 = \frac{q_1}{n_1} = \frac{7.891 \times 10^{-19}}{5} = 1.578 \times 10^{-19} \text{ C}$$

(4) 第四个油滴

$$q_1 = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{\left[\bar{t}_1 (1 + 0.02 \sqrt{\bar{t}_1}) \right]^2} \cdot \frac{1}{U_1} = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{17.13 \times (1 + 0.02 \sqrt{17.13})^2} \cdot \frac{1}{219} = 8.174 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$n_1 = \frac{q_1}{e} = \frac{8.174 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 5.103 \approx 5$$

$$e_1 = \frac{q_1}{n_1} = \frac{8.174 \times 10^{-19}}{5} = 1.635 \times 10^{-19} \text{ C}$$

(5) 第五个油滴

$$q_1 = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{\left[\bar{t}_1 (1 + 0.02 \sqrt{\bar{t}_1}) \right]^2} \cdot \frac{1}{U_1} = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{26.80 \times (1 + 0.02 \sqrt{26.80})^2} \cdot \frac{1}{219} = 3.055 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$n_1 = \frac{q_1}{e} = \frac{3.055 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 5.103 \approx 5$$

$$e_1 = \frac{q_1}{n_1} = \frac{3.055 \times 10^{-19}}{2} = 1.528 \times 10^{-19} \text{ C}$$

(6) 电子电荷平均值:

$$\bar{e} = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5}{5} = \frac{1.659 + 1.548 + 1.578 + 1.635 + 1.528}{5} = 1.590 \times 10^{-19} \text{ C}$$

与公认值的误差:

$$E = \left| \frac{e - \bar{e}}{e} \right| = \left| \frac{1.602 - 1.590}{1.602} \right| = 0.75\%$$

现象分析:

(1) 本实验是对密立根油滴实验的验证。按照密立根的方法, 测出大量油滴的电量后取它们的最大公约数, 进而得到电子电荷。本次实验只测量 5 个油滴的电量, 利用公认的电子电荷进行“倒过来”方法验证, 存在一定的误差。

(2) 测量误差主要是: 第一是平衡电压存在一定误差, 在该电压下油滴仍有微小的运动, 并未达到绝对的静止状态; 第二是记录时间存在一定误差, 在油滴通过两个刻度线时由于油滴的尺寸导致计时时有误差。

(3) 油滴下落时间太长或太短都可能产生较大的误差。下落时间太长的油滴，在多次测量后挥发得较多，对测量结果造成影响；下落时间短的油滴，其携带的电荷数较多，导致测量得到的电子电荷误差较大。平衡电压在 200-300 V 之间容易使油滴下落时间满足 10-30 秒范围，使测量结果更加准确。

八. 问题讨论与实验拓展

(一) 问题讨论

1. 当跟踪观察某一油滴时，原来清晰的像变模糊了，可能的原因是什么？

答：油滴发生与观察方向一致的横向运动，原来清晰的像可能变模糊了。这有两个可能的原因：第一是两个电极板未调成水平，可能导致油滴下落不是直线；第二是油滴室上面的盖子未盖严，可能导致极板间空气流动，改变了油滴下落轨迹。此时应调节水准泡或者盖严油滴室的盖子，同时调节显微镜旋钮，防止油滴在视野中消失。

2. 由于油的挥发，油滴的质量会不断下降。当长时间跟踪测量同一个油滴时，由于油滴的挥发，会使哪些测量量发生变化？

答：当油滴质量减小之后，由电量公式 $q = mgd/U$ 可知平衡电压 U 下降。随着油滴质量的减小，其半径 a 减小，由公式 $a = \sqrt{9\eta l / 2g\rho t}$ ，可知油滴匀速下落 l 距离的时间 t 变大。油滴质量减小同时引起了平衡电压 U 和下落时间 t 的变化，对油滴电量的测定有一些影响。由油滴电量的计算公式可知， U 下降和 t 变大整体效果对测量油滴电量的影响不大。

(二) 实验拓展

1. 同一油滴改变电荷法

在平衡法或动态法的基础上，用汞灯照射目标油滴，使之改变电量，表现为原有的平衡电压已不能保持油滴的平衡，然后用平衡法或动态法重新测量。具体步骤：当已经将某粒油滴（选择颗粒较大的油滴）调节平衡后（最好选取屏中央的油滴），按下汞灯按钮不放，维持 10-30 秒钟。在刚刚按下去的几秒钟内，虽然油滴的带电量还没改变，但已调好的平衡电压会发生改变，平衡将被打破，此时松开汞灯按钮，重新调节平衡电压以测量油滴的电量。同一油滴改变电荷法是密立根油滴实验的精髓，同一油滴改变电荷法能更鲜明地体现出电荷量子化的现象。

2. 测量油滴的布朗运动

在实验过程中，如果油滴较小，布朗运动非常明显，通过高倍显微物镜，可以实现测量布朗运动。

参考文献：

- [1] 陈思羽,赵春然.密立根与密立根油滴实验——纪念密立根获诺贝尔物理学奖100周年[J]. 物理教师, 2023, 44(05): 77-80.
- [2] 吴致浩,周昊,刘超卓,朱海丰,王龙.关于密立根油滴实验中的几个问题探究[J]. 大学物理实验, 2023, 36(02): 31-35.