

实验 8.1.1 用密立根油滴实验测电子电荷 e

实验要求：

1. 本实验寻找至少 3 个油滴。每个油滴带电量 $\leq 5e_0$ （5 个元电荷电量）。
2. 首先粗略调平工作台。了解并熟悉喷雾器的使用。
3. **【注意】做以下几个操作、维修前，一定要先关闭电源，再进行。**
 - （1）实验中，不能移开仪器上面的塑料喷雾室，因为有高压。
 - （2）切实需要疏通平行板上极板中心漏孔时，
 - （3）切实需要维护其他部件时。
4. 油滴在电场中平衡时，电压值理论上只有一个数值。但由于测量误差的存在，应是一个小的范围。在此范围内，视觉感受不到油滴明显向上（或向下）移动，布朗运动除外。
5. 结合实验室给出的仪器参数值，用计算器来计算油滴的带电量（实验报告中）。
不得使用仪器厂家给的计算机软件来计算。
6. 分析并计算其中一个油滴带电量数值 q 的不确定度 u_q （置信水平 $P = 95\%$ ）。

2016 年 2 月 26 日星期五

实验 8.1.1 用密立根油滴实验测电子电荷 e

(本文内容选自高等教育出版社《大学物理实验》)

著名的美国物理学家密立根 (Robert A. Millikan) 在 1909 年到 1917 年期间所做的测量微小油滴上所带电荷的工作, 即油滴实验, 是物理学发展史上具有重要意义的实验。这一实验的设计思想简明巧妙, 方法简单, 而结论却具有不容置疑的说服力, 因此这一实验堪称物理实验的精华和典范。密立根在这一实验工作上花费了近 10 年的心血, 从而取得了具有重大意义的结果, 那就是 (1) 证明了电荷的不连续性 (具有颗粒性)。(2) 测量并得到了元电荷即为电子电荷, 其值为 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。现公认 e 是元电荷, 对其值的测量精度不断提高, 目前给出最好的结果为

$$e = (1.60217733 \pm 0.00000049) \times 10^{-19} \text{ C}$$

正是由于这一实验的成就, 他荣获了 1923 年诺贝尔物理学奖金。

80 多年来, 物理学发生了根本的变化, 而这个实验又重新站到实验物理的前列, 近年来根据这一实验的设计思想改进的用磁漂浮的方法测量分数电荷的实验, 使古老的实验又焕发了青春, 也就更说明密立根油滴实验是富有巨大生命力的实验。

本实验的目的, 是学习测量元电荷的方法, 并训练物理实验时应有的严谨态度与坚忍不拔的科学精神。

实验原理

密立根油滴实验测定电子电荷的基本设计思想是使带电油滴在测量范围内处于受力平衡的状态。按油滴作匀速运动或静止运动两种运动方式分类, 油滴法测电子电荷分动态测量法和平衡测量法。

1. 动态测量法

考虑重力场中一个足够小油滴的, 设此油滴半径为 r , 质量为 m_1 , 空气是粘滞流体, 故此运动油滴除重力和浮力外还受粘滞阻力的作用。由斯托克斯定律, 粘滞阻力与物体运动速度成正比。设油滴以匀速度 v_f 下落, 则有

$$m_1 g - m_2 g = K v_f \quad (1)$$

此处 m_2 为与油滴同体积的空气质量, K 为比例系数, g 为重力加速度。油滴在空气及重力场中的受力情况如图 8.1.1-1 所示。

若此油滴带电荷为 q , 并处在场强为 E 的均匀电场中, 设电场力 qE 方向与重力方向相反, 如图

8.1.1-2 所示，如果油滴以匀速 v_r 上升，则有

$$qE = (m_1 - m_2)g + Kv_r \quad (2)$$

由 (1) 和 (2) 消去 K ，可解出 q 为

$$q = \frac{(m_1 - m_2)g}{Ev_f} (v_1 + v_r) \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出，要测量油滴上携带的电荷 q ，需要分别测出 m_1 、 m_2 、 E 、 v_f 、 v_r 等物理量。



图 8.1.1-1 重力场中油滴受力示意图



图 8.1.1-2 电场中油滴受力示意图

由喷雾器喷出的小油滴的半径 r 是微米数量级，直接测量其质量 m_1 也是困难的，为此希望消去 m_1 ，而代之以容易测量的量。设油与空气的密度分别为 ρ_1 、 ρ_2 ，于是半径为 r 的油滴的视重为

$$m_1g - m_2g = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g \quad (4)$$

由斯托克斯定律，粘滞流体对球形运动物体的阻力与物体速度成正比，其比例系数 K 为 $6\pi\eta r$ ，此处 η 为粘度， r 为半径。于是可将式 (4) 带入式 (1)，有

$$v_f = \frac{2gr^2}{9\eta}(\rho_1 - \rho_2) \quad (5)$$

因此

$$r = \left[\frac{9\eta v_f}{2g(\rho_1 - \rho_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

以此代入式 (3) 并整理得到

$$q = 9\sqrt{2}\pi \left[\frac{\eta^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{E} \left(1 + \frac{v_r}{v_f} \right) v_f^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

因此，如果测出 v_f 、 v_r 和 η 、 ρ_1 、 ρ_2 、 E 等宏观量即可得到 q 值。

考虑到油滴的直径与空气分子的间隙相当，空气已不能看成连续介质，其粘度 η 需作相应的修

正 $\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}}$ 此处 p 为空气压强， b 为修正常数， $b=0.00823 \text{ N/m}$ ，因此，

$$v_f = \frac{2gr^2}{9\eta}(\rho_1 - \rho_2)(1 + \frac{b}{pr}) \quad (8)$$

当精确度要求不太高时，常采用近似计算方法先将 v_f 值代入 (6) 计算得

$$r_0 = \left[\frac{9\eta v_f}{2g(\rho_1 - \rho_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

再将 r_0 值代入 η' 中，并以 η' 代入 (7)，得

$$q = 9\sqrt{2}\pi \left[\frac{\eta^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{E} \left(1 + \frac{v_r}{v_f} \right) v_f^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

实验中常常固定油滴运动的距离，通过测量它通过此距离 s 所需要的时间来求得其运动速度，且电场强度 $E = \frac{U}{d}$ ， d 为平行板间的距离， U 为所加电压，因此，式 (10) 可写成

$$q = 9\sqrt{2}\pi d \left[\frac{(\eta s)^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{U} \left(\frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_r} \right) \left(\frac{1}{t_f} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

式中有些量和实验仪器以及条件有关，选定之后在实验过程中不变，如 d 、 s 、 $(\rho_1 - \rho_2)$ 及 η 等，将这些量与常数一起用 C 代表，可称为仪器常数，于是 (11) 简化成

$$q = C \frac{1}{U} \left(\frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_r} \right) \left(\frac{1}{t_f} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

由此可知，量度油滴上的电荷，只体现在 U 、 t_f 、 t_r 的不同，对同一油滴， t_f 相同， U 与 t_r 的不同，标志着电荷的不同。

2. 平衡测量法

平衡测量法的出发点是，使油滴在均匀电场中静止在某一位置，或在重力场中作匀速运动。

当油滴在电场中平衡时，油滴在两极板间受到电场力 qE 、重力 m_1g 和浮力 m_2g 达到平衡，从

而静止某一位置。即

$$qE = (m_1 - m_2)g$$

油滴在重力场中作匀速运动时，情形同动态测量法，将式（4）、（9）和 $\eta' = \eta \frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}}$ 代入式(11)

并注意到 $\frac{1}{t_r} = 0$, 则有

$$q = 9\sqrt{2}\pi d \left[\frac{(\eta s)^3}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{U} \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}} \right]^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{t_f} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

3. 元电荷的测量法

测量油滴上带的电荷的目的是找出电荷的最小单位 e 。为此可以对不同的油滴，分别测出其所带的电荷值 q_i ，它们应近似为某一最小单位的整数倍，即油滴电荷量的最大公约数，或油滴带电量之差的最大公约数，即为元电荷。

实验中常采用紫外线、X 射线或放射源等改变同一油滴所带的电荷，测量油滴上所带电荷的改变值 Δq_i ，而 Δq_i 值应是元电荷的整数倍。

$$\text{即} \quad \Delta q_i = n_i e \quad (\text{其中 } n_i \text{ 为一整数}) \quad (13)$$

也可以用作图法求 e 值，根据（13）， e 为直线方程的斜率，通过拟合直线，即可求得 e 值。

实验内容

学写控制油滴在现视场中的运动，并选择合适的油滴测量元电荷。要求测得 9 个不同的油滴或一个油滴所带电荷改变 7 次以上。

1. 选择适当的油滴并测量油滴上所带的电荷

要作好油滴实验，所选的油滴体积要适中，大的油滴虽然比较亮，但一般带的电荷多，下降速度太快，不容易测准确；太小则受布朗运动影响明显，测量结果涨落很大，也不容易测准确。因此应该选择质量适中，而带电不多的油滴。

2. 调整油滴实验装置

油滴实验装置是由油滴盒、油滴照明装置、调平系统、测量显微镜、供电电源以及电子停表、喷雾器等组成的，其装置如图 8.1.1-3 所示。其中油滴盒是由两处经过精磨的金属平板，中间垫以

胶木圆环，构成的平行板电容器。在上板中心处有落油孔，使微小油滴可进入电容器中间的电场空间，胶木圆环上有进光孔、观察孔。进入电场空间内的油滴由照明装置照明，油滴盒可通过调平螺旋调整水平，用水准仪检查。油滴盒防风罩前装有测量显微镜，用来观察油滴。在目镜头中装有分划板，如图 8.1.1-4(请思考，电容器两极板不水平对测量有何影响?)

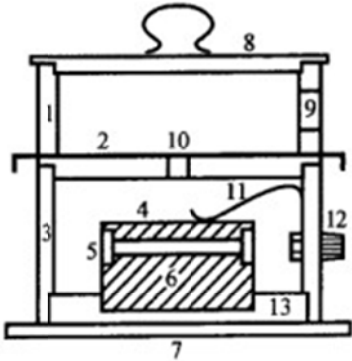


图 8.1.1-3 油滴实验装置图

1—油雾室;2—油雾孔开关;3—防风罩;4—上电极板;5—胶木圆环;6—下电极板;7—底板;8—上盖板;9—喷雾口;10—油雾孔;11—上电极板压簧;12—上电极板电源插孔;13—油滴盒基座

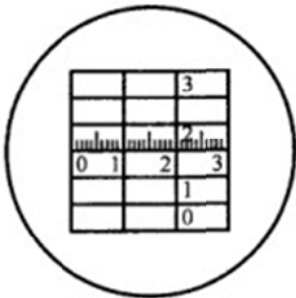


图 8.1.1-4 油滴实验装置视

场中的分划板

电容器板上所加电压由直流平衡电压和直流升降电压两部分组成。其中平衡电压大小连续可调，并可从伏特计上直接读数，其极性换向开关控制, 以满足对不同极性电压的需要。升降电压的大小可连续调节，并可通过换向开关叠加在平衡电压上，以控制油滴在电容器内的上下位置，但数值不能从伏特计读出，因此在控制油滴的运动和测量时，升降电压应拨到零。

油滴实验是一个操作技巧要求较高的实验，为了得到满意的实验结果，必须仔细任职调整油滴仪。

- (1) 首先要调节调平螺丝，将平行电极板调到水平，使平衡电场方向与重力方向平行以免一起实验误差。
- (2) 为了使望远镜迅速、准确地调焦在油滴下落区，可将细铜丝或玻璃丝插入上盖板（8）的小孔中，此时上下极板必须处于短路状态，即外加电压为零，否则将损坏电源或涉及人身安全。调整目镜使横丝清晰、位置适当，调整物镜位置使铜丝或玻璃丝成像在横丝平面上，并调整光源，使其均匀照亮，背景稍暗即可。调整后望远镜位置不得移动。取出铜丝或玻璃丝（此点切不可忘记!），盖好屏幕盒盖板。
- (3) 喷雾器是用来快速向油滴仪内喷油雾的，在喷射过程中，由于摩擦作用使油滴带电，为了在视场中获得足够供挑选的油滴，在喷射油雾时，一定要将油滴仪两极短路。（请思考，若不短路，对实验有何影响？）

当油雾从喷雾口喷入油滴室内后，视场中将出现大量清晰的油滴，有如夜空繁星。试加上平衡

电压，改变其大小和极性，驱散不需要的油滴，练习控制其中一颗油滴的运动，并用停表记录油滴经过两条横丝间距离所用的时间。

为了提高测量结果的精确度，每个油滴上、下往返次数不宜少于 8 次，要求测得 9 个不同的油滴或一个油滴所带电量改变 7 次以上。

3. 读取实验室给定的其他有用常数，计算电荷的基本单位（数据处理方法不限），并选取一个油滴计算所带电荷量的相对不确定度 $\frac{u_q}{q}$ ，绝对不确定度 u_q （以及此油滴带电量的结果表达式）。

思考题

1. 为什么必须使用油滴作匀速运动或静止？实验室中如何保证油滴在测量范围内作匀速运动？
2. 怎样区别油滴上电荷的改变和测量时间的误差？
3. 试计算直径为 10^{-6}m 的油滴在重力场中下落达到力的平衡状态时所经过的距离。