

实验讲义 用密立根油滴实验测电子电荷

实验要求：

1. 预习阶段

- (1) 认真阅读实验讲义。可查阅与实验相关的资料。
- (2) 本学期预习考核方式为在线测验，不再要求写预习报告。在线测验只能完成一次，如多次作答，后面提交的作答无效，请大家完成实验讲义的预习后再作答。

2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯放在光学平台上，不得在实验室内吃东西。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在听完老师讲解后才能动手操作。在动手操作前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。

3. 本实验完成后，要求写一份正式的实验报告。

4. 实验完毕，关闭电源，盖好实验仪器盖子。收拾实验台，保持干净卫生。

5. 实验原始数据，需当堂教师签字认可，方可离开实验室。

6. 离开实验室前，登录选课系统，完成“出门测”试题解答。

本实验的“出门测”，可能与其他实验的“出门测”可能略有不同。本实验“出门测”试题类型是填空题，要求实验同学填写平衡测量法中，2 颗油滴“平衡电压”和“自然下落 2mm 的时间”的数值数字，以便老师收集后形成数据库，供后组同学统计出元电荷电量 e_0 值。

同学填写“出门测”时，不得“乱涂乱画”，输入政治敏感文字，以及与实验数据无关的文字内容和数字。

用密立根油滴实验测电子电荷

电子是人们在微观世界探索中最早发现的带有单位负电荷的一种基本粒子，它的发现直接涉及到对原子结构的研究。1897 年英国科学家 J.J 汤姆森设计了阴极射线管，根据阴极射线在电场作用下引起的荧光斑点的偏转半径，推算出阴极射线粒子的荷质比 e/m ，才真正从实验上认识电子的存在。通过进一步实验发现，当改变阴极物质材料或改变阴极管内气体种类，测得的荷质比 e/m 保持不变，这就证明了电子是各种材料中的普适成分。自从 J.J 汤姆森发现电子后，不少科学家进行了不断地实验，较为精确地测量了电子的电荷值，其中最具有代表性的是美国科学家密立根（Robert A. Millikan），他在 1909 年到 1917 年期间所做的测量微小油滴上所带电荷的测量工作，即油滴实验。这一实验是物理学史上具有重要意义的实验，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。被 2002 年 09 月美国《物理世界》杂志评为最美丽的十大物理实验之一。因此，这一实验堪称物理实验的精华和典范，在物理学发展史上具有重要意义。密立根在这一实验工作中花费了近 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、量子性）。（2）测量并得到了元电荷 e （即电子电荷）的电量值为 $1.60 \times 10^{-19} C$ 。随着测量精度不断提高，目前给出最好的结果为

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

正是由于这一实验成就，他荣获了 1923 年诺贝尔物理学奖。

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思想改进的、用磁漂浮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。

待研究的问题

1. 学习并控制带电油滴在静电场中的运动
2. 测量带电油滴在静电场中的运动
3. 学习元电荷电量的测量统计方法

实验原理

在密立根油滴实验中，测量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状态。按油滴作匀速或静止两种运动状态分类，可分为动态测量法和平衡测量法。

1. 动态测量法

重力场中一个小的油滴，半径为 r ，质量为 m_1 。空气是粘滞性流体，故此运动的油滴，除受重力和浮力外，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。设油滴以均匀速度 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 24-1 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 24-2 所示，如果油滴以匀速 v_r 上升，则有

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

由 (1) 和 (2) 消去 K ，可解出 q 为

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

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



图 24-1 重力场中油滴受力示意图



图 24-2 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

$$m_1 g - m_2 g = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g \quad (4)$$

由斯托克斯定律，粘滞流体对低速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， $b = 0.00823 N/m$ ，因此，

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

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

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

实验中常常固定油滴运动的距离，通过测量油滴通过此距离 s 所需要的时间来求出运动速度。

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

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

式中有些量与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_r 相同, U 和 t_f 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

测量油滴上所带电荷的目的, 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。此最小单位, 为油滴电荷量的最大公约数, 或不同油滴带电量之差的最大公约数, 即为元电荷。有

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

实验中常采用紫外线、 x 射线或放射源等照射油滴，来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 值也应是元电荷的整数倍。

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。

实验装置

油滴实验装置是由油滴盒、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 24-3 所示。其中油滴盒是由两块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。在目镜镜头中装有分划板，如图 24-4 所示(请思考，电容器两极板不水平对测量有何影响?)

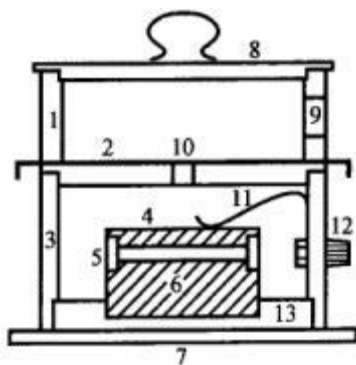


图 24-3 油滴实验装置图

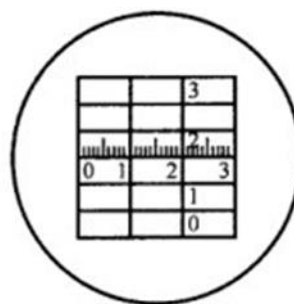


图 24-4 油滴实验装置视场中的分划板

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—底座；8—上盖板；9—喷雾；10—油孔雾；11—上电极板压簧；12—上电极电源插孔；13—油滴盒基座

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，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。

另外，部分仪器上还配有紫色灯，紫色灯发出光通过胶木圆环上进光孔，照射平行板电容器内部的带电油滴。经过短时间照射，油滴上的个别电子会损失掉，以达到改变油滴带电量的目的。

实验要求

一、预习要求

- 1.了解油滴在受力平衡下的几种运动状态
- 2.了解油滴下落运动过程中，空气不能看作理想流体的原因，以及如何修正。
- 3.为了测量油滴上的带电量，需要测量和记录几个物理量值
- 4.知道怎样从统计分析上得出基本电荷量（即元电荷量）的值

二、实验过程要求

学习控制油滴在视场中的运动，并选择合适的油滴来测量。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

要做好本次油滴实验，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，而带电量不多的油滴。

2. 调整油滴实验装置

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，必须仔细认真调整油滴仪。

（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引起实验误差。

（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。调整好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！），盖好油滴盒上盖板。

（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多供挑选的油滴，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。

3.测量油滴平衡电压和下落时间

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。

三、实验报告要求

1. 读取实验室仪器给定的其他有用参数和常数，根据每一颗油滴的平衡电压和下落时间，计算出其带电量（平衡测量法）。
2. 用统计学分析方法，从这 N 颗油滴带电量的数值中，分析出元电荷的电量值。即： N 颗油滴带电量数值的最小公倍数。
3. 选取一个油滴，计算其所带电荷量的相对不确定度 $\frac{u_q}{q}$ ，和绝对不确定度 u_q 。

思考题

一、预习思考题

1. 为什么必须使油滴作匀速运动或静止运动状态？
2. 相对于下落的微小油滴而言，空气能看成理想流体吗？本实验作了如何修正。
3. 你能想出其他方法，测量基本元电荷电量吗？

二、实验过程思考题

1. 实验室中如何保证油滴在测量范围内作匀速运动？
2. 油滴上电荷量的改变，主要体现在平衡电压的变化，还是下落时间的变化？
3. 油滴下落时间要求多次测量，以消除随机误差的影响。而油滴静止状态的平衡电压也需多次测量吗？仅仅测量平衡电压的上下限，是否可行？

三、实验报告思考题

1. 油滴带电量表达式中，空气粘滞系数的非理想流体模型的修正量，其数量级有多大？对油滴带电量的相对不确定度影响（贡献）有多大？
2. 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。

参考资料

[1]吴泳华，霍剑青，浦其荣 大学物理实验 高等教育出版社 2005 239–244

[2]Millikan, R.A. (1913), On the Elementary Electric charge and the Avogadro Constant[J]. Physical Review, Vol:II, Series:2, 109-143.

[3]吴泳华主编，近代物理实验。中国科学技术大学出版社，1992，1–5

[4]杨述武，孙迎春，沈国土，赵立竹主编 普通物理实验（4）（综合设计部分） 第五版 高等教育出版社 2016 63–68

[5]王廷兴，郭山河，文立军 主编 大学物理实验 上册 （理工基础部分）高等教育出版社 2003 223–229

[6]高立模 主编 近代物理实验 南开大学出版社 2006 65–71

附录 1

密立根油滴带电量的测量数据记录表（静态测量法）

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------|---------------------|----|---|---|---|-----|-----------------|-------------------------|---------------|---------|---------|---------|--|
| | | 表1：密立根油滴实验（实验数据记录表） | | | | | | | | | | | | |
| 第一颗油滴 | | | | | | | | | | | P=95% | P=95% | P=95% | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 平均值 $\langle x \rangle$ | 列标准差 σ | $u(A)=$ | $u(B)=$ | $u(x)=$ | |
| 下落时间 t | | | | | | | | | | | | | | |
| | 8个不同的电压值 | | | | | | | | | | | | | |
| 平衡电压 U （方式1） | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | 当前值 | 上限 | 下限 | | | | 中心值 | (上限-下限)/2 | $u(A)=$ | $u(B)=$ | $u(x)=$ | | | |
| | | | | | | | | = 最大允差 Δ | | | | | | |
| 平衡电压 U （方式2） | | | | | | | | | 0 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |