

密立根油滴实验

美国物理学家密立根(Robert A.Millikan)历时七年之久,在 1909 年到 1917 年期间通过测量微小油滴所带的电荷,即油滴实验,不仅测定了电量的最小单位——基本电荷电量 e ,即电子所带电量,其值为 $1.60\times 10^{-19}\text{C}$ (随着测量精度不断提高,目前最精确结果是 $e=(1.602\ 177\ 33\pm 0.000\ 000\ 49)\times 10^{-19}\text{C}$),证明了电荷的不连续性,即所有的电荷都是基本电荷电量的整数倍;更为从实验上测定电子质量、普朗克常量等其它物理量提供了可能性,大大促进了人们对电和物质结构的研究和认识。

密立根油滴实验中将微观量测量转化为宏观量测量的巧妙构思,以及用较简单的仪器测得比较精确的结果等都是富有创造性的。正是由于这一实验的巨大成就,密立根获得了 1923 年诺贝尔物理学奖。。

九十多年来,密立根的实验装置随着技术进步而得到不断的改进,但其实验原理至今仍在当代物理科学研究的前沿发挥着作用。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。

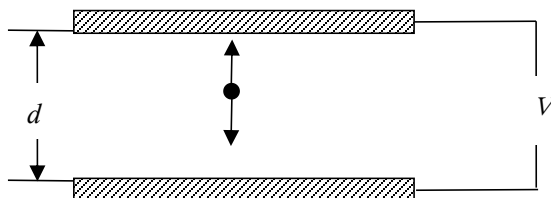
在下面的实验中,我们要了解密立根油滴仪的结构,掌握利用油滴测定基本电荷电量的设计思路和方法;并使用平衡法测量基本电荷电量的大小,验证电荷的不连续性。

实验中采用的油滴仪,电源,喷雾器,秒表等相关技术指标见前文实验设备介绍中部分。

【实验原理】

密立根油滴实验测定基本电荷电量的基本思想,是观察和研究带电油滴在电场中的运动规律。

如右图所示,间距为 d 的两个平行板,上板有一小孔供喷入油滴,当油滴经喷雾器喷出时已带电。油滴在两平行极板间会受到重力和静电力的作用而运动,按其运动方式分类,利用油滴测量基本电荷电量可分为平衡测量法和动态测量法。



平行极板电场中的油滴

平衡（静态）测量法：

平衡测量法的出发点是调整两极板间的电压使油滴在均匀电场中静止或在重力作用下作匀速运动。

设油滴的质量为 m , 所带的电量为 q , 两极板间的电压为 V , 平行极板间距为 d , 如上图所示。

调节两平行极板间的电压 V , 可使油滴的重力和静电力达到平衡, 这时：

$$mg = qE = q \frac{V}{d}$$

为了测出油滴所带的电量 q , 除了需测定平衡电压 V 和极板间距 d 外, 还需要测量油滴的质量 m 。油滴的质量很小, 可使用如下方法测定: 平行极板间不加电压时, 油滴受重力作用而加速下降。由于空气阻力的作用, 在下降一段距离油滴速度达到 v_g 后, 空气阻力 f_r 与重力 mg 将达到平衡 (忽略空气浮力), 油滴将处于匀速下降的状态。此时空气阻力为:

$$f_r = 6\pi a \eta v_g = mg$$

其中 η 是空气的粘滞系数, a 是油滴的半径。

由于油滴非常小, 与空气分子的平均自由程可相比拟, 此时不能再将空气看成是连续介质, 油滴所受空气阻力必将减小, 空气的粘滞系数应予以修正, 修正为:

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}}$$

其中 b 是修正常数 $6.17 \times 10^{-6} m \cdot cmHg$, p 为大气压强, 单位为厘米汞柱。

油滴匀速下降的速度 v_g , 可如下测出: 当两平行极板间不加电压时, 设油滴匀速下降的

距离为 l ，时间为 t_g ， $v_g = \frac{l}{t_g}$

油滴的密度为 ρ ，则其质量为 $m = 4/3\pi a^3 \rho$

联立以上公式，可得到测定油滴电荷的计算公式为：

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

动态（非平衡）测量法：

动态（非平衡）测量法是在平行极板上加以适当电压 V ，使静电力大于重力而让油滴加速上升。由于空气阻力的作用，在上升一段距离油滴速度达到 v_e 后，空气阻力、油滴重力与静电力达到平衡（忽略空气浮力），油滴将处于匀速上升的状态。此时空气阻力为：

$$6\pi a \eta v_e = q \frac{V}{d} - mg$$

当去掉平行极板上所加的电压 V 后，油滴受重力作用而加速下降。当空气阻力和重力平衡时，油滴将以匀速 v_g 下降，这时： $6\pi a \eta v_g = mg$

$$\text{故可计算出 } q = mg \frac{d}{V} \left(\frac{v_g + v_e}{v_g} \right)$$

实验中取油滴匀速下降和匀速上升的距离相等，都为 l 。测量出油滴匀速下降的时间为 t_g ，油滴匀速上升的时间为 t_e ，则： $v_g = \frac{l}{t_g}$ ； $v_e = \frac{l}{t_e}$

联立以上公式，可得到测定油滴电荷的计算公式为：

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{\left(1 + \frac{b}{pa}\right)} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{d}{V} \left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

用平衡测量法，原理直观简单，实验操作中需仔细调整平衡电压；用动态测量法，原理和数据处理比较麻烦些，实验操作中一疏忽即导致油滴丢失，但不需要调整平衡电压。

【实验内容】

实验中需要学习如何控制油滴在视场中的运动,并选择合适的油滴以测量基本电荷电量。为保证准确性,实验中要求至少测量 5 个不同的油滴,每个油滴测量次数应在 5 次以上。

实验大致分为以下几个部分:

1、调节仪器

调整实验仪底部的旋钮,通过水准仪将实验平台调平,保证静电场方向与重力方向平行以免引起实验误差。极板平面是否水平决定了油滴在下落或提升过程中是否会发生其他方向的漂移。

调节照明电路和显微镜的目镜,从测量显微镜中观察,如果分划板位置不正,则转动目镜头,将分划板放正。调节接目镜,使分划板刻线清晰。

将少量油缓慢注入喷雾器的储油腔内,油不要太多,以免实验过程中堵塞落油孔。

从喷雾口喷入油雾(喷一次即可),此时视场中应能观察到大量清晰的油滴。若没有看到清晰的油滴,则需调整显微镜的调焦手轮或检查喷雾器是否有油雾喷出,直至观察到清晰的油滴。

2、熟悉实验仪器并练习测试

认真阅读实验仪器说明书,选择适当的油滴并练习控制油滴。

调节平衡电压至 200-300 伏特左右,喷入油滴,把平衡电压加到平行极板上,大多数油滴会以不同速度向上或向下运动而消失。在驱走不需要的油滴后,视场中会剩下几颗运动缓慢的油滴。选择其中一颗,仔细调节平衡电压的大小,使油滴保持静止不动。再通过调整升降电压,去掉/加上极板的平衡电压让油滴反复升降,重复练习以达到熟练控制油滴运动的程度。如练习过程中发现油滴变模糊,需微调显微镜跟踪油滴,保持油滴清晰可见。

选则的油滴体积不能太大,太大的油滴虽然比较亮,但一般带的电量比较多,下降速度也比较快,时间不容易准确测量。油滴的体积太小的话则会有明显的布朗运动。所以,选择一个大小合适,带电量适中的油滴,是做好本实验的关键。通常可以选择平衡电压在 200 到 300 伏特间,匀速下降 2 mm 所用时间在 8-30 s 内的油滴,其大小和带电量都比较合适。

选择好适当的油滴,调整平衡电压和升降电压,使油滴平衡在接近上极板处。去掉电压,待油滴下降速度稳定后,以油滴通过某一格线处开始计时,记录下降格数和所用时间,反复练习以熟练掌握测量时间。

3、正式测量

本实验中选用的是平衡(静态)测量法来进行正式测量。为了减少实验的偶然误差,我们将采用多次测量,至少测量 5 个不同的油滴,每个油滴测量次数应在 5 次以上。正式测量前请先设计好实验表格以记录实验数据。

用平衡测量法时要测量的有两个量,一个是平衡电压 V ,一个是油滴匀速下降一段距离

所需要的时间 t_g ，大气压强则使用标准大气压值。仔细调节“平衡电压”旋钮，使油滴置于分划板上某一格线附近。选定好下降的格数，也就是要测量的一段距离，然后去掉电压使油滴自由下落。

测量油滴匀速下降一段距离所需要的时间 t_g ，为保证油滴匀速下降，应先让它下降一格后再开始计时。选定好下降的格数，应该在平行极板的中间部分，即视场中分划板的中央部分。

测量完一次油滴下降时间后，加上电压并重新调整平衡电压使油滴回到原来同一格线处，为下次测量做好准备。对同一颗油滴进行 5 次以上下降时间的测量，且每次测量都要重新调整平衡电压。对 5 个不同的油滴重复以上测量流程。

测试完毕后，整理实验记录数据，代入平衡测量法的电荷计算公式中计算油滴所带电荷量。通过对实验数据的整理计算，我们可以探讨一个问题：不同的油滴所携带的电荷量是否都是基本电荷电量 e 的整数倍？电荷是否存在不连续性，并存在最小的电荷单位，即基本电荷电量 e ？

【注意事项】

- 1、仪器使用环境：温度为 0-40℃ 的静态空气中。
- 2、注意调整进油量开关，避免外界空气流动对油滴测量造成影响。
- 3、实验前应对油滴盒内部进行清洁，防止异物堵塞落油孔。
- 4、实验中油滴盒上下电极间有高压产生，请不要将油雾杯取下来，以防触电。

【思考题】

- 1、实验中应选择什么样的油滴？如何选择？
- 2、如何判断油滴盒内平行极板是否水平？不水平的话对实验结果有何影响？
- 3、油滴下落极快或极慢，各说明了什么？
- 4、若一个油滴所需平衡电压太大或太小，各说明了什么？
- 5、为了减少计时误差，油滴下落是否越慢越好？为什么？
- 6、观察中发现油滴变模糊，是什么问题？该如何处理？
- 7、对实验结果会造成影响的主要因素有哪些？