

密立根油滴实验问题三则

肖 勇,董 键

(曲阜师范大学 物理工程学院,山东 曲阜 273165)

摘要:密立根油滴实验在教学上依然存在诸多问题,比如元电荷的测量值偏差较大、元电荷的“目标函数法”求解方法问题以及油滴仪上紫外灯的使用等,若处理不好,会影响教学效果.本文认为元电荷的测量值偏差较大与显微镜分划板的准确性有关,也与实验者没有对油滴像调焦有关.“目标函数法”求解元电荷精度较高,本文对此用法进行了梳理,澄清了难点.紫外灯不能仅仅做为改变油滴电量的手段,本文从初始带有一个元电荷的油滴开始,通过测量每次电离之后的平衡电压,用电压的比值可以直观地证明电量量子化.

关键词:密立根油滴实验;元电荷;目标函数;紫外电离;电量量子化

中图分类号:O 562.2

文献标识码:A

文章编号:1000-0712(2022)03-0073-05

【DOI】10.16854/j.cnki.1000-0712.210281

密立根油滴实验是一个有百年历史的经典实验,它所揭示的电量量子化有重大的科学意义.该实验因为能直观地证明电量量子化,被选入大学物理实验,被一代代大学生所尊崇和重复,产生了良好的教学效果.但是,该实验在教学上的问题依然很多,需要进一步研究和澄清.本文将研究 3 个问题:元电荷的测量值偏差较大问题,元电荷的“目标函数”求解方法问题,以及油滴仪上紫外灯的使用方向问题,以期对做好油滴实验有所帮助.

1 元电荷的测量值偏差较大

油滴教学实验仪的设计生产参差不齐,而且使用久了性能也会发生一些变化,会导致所测量到的元电荷值偏离物理常数推荐值,这个现象并非罕见.以笔者所在实验室为例,就有两个批次的 MOD5 型油滴仪存在此类现象.为了研究此现象,笔者采用“平衡测量法”测量油滴电量,喷油采用 701 钟表油,所测量的油滴超过 300 个,电量 q 的计算采取如下精确公式^[1]:

$$q = \frac{d\pi}{3gp^3\rho t^2U} \left[(9lp^2\eta_0 + 2b^2gpt) \sqrt{gpt(18lp^2\eta_0 + b^2gpt)} - 27bglp^2\rho\eta_0 t - 2b^3g^2\rho^2t^2 \right] \quad (1)$$

其中, U 表示平衡电压, t 表示油滴下落距离 l 所用的时间, U 和 t 是要测量的量, $q = q(t, U)$; 其余的参量在测量中要保持常数, d 表示两电极板之间的距

离, g 表示重力加速度, ρ 表示油的密度, p 表示大气压, η_0 表示空气黏度, b 表示黏度修正常数, $b = 8.23 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$. 实验温度取 18°C , 气压取 $1.011 \times 10^5 \text{ Pa}$, 是记录的气象条件的中间值.

图 1 是使用期超过 20 年的油滴仪所测电量的分布图,横轴表示油滴编号,纵轴表示电量.电量呈现明显的分组性,这是量子化的表现.求得每组电量的平均值,对平均值分布进行线性拟合,拟合线的斜率即是元电荷 e 的值,结果见图 2, $e = 1.481 \times 10^{-19} \text{ C}$. 这比最新国际推荐值^[2] $1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$ 小了 7.55%, 偏离是明显的,其原因值得追究.

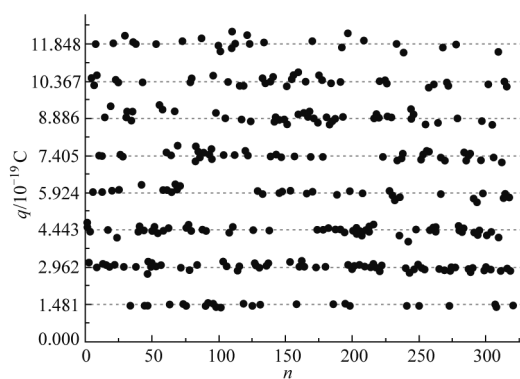


图 1 油滴电量量子化分布

根据式(1),与电量 q 相关的变量有 ρ 、 η_0 , 它们随温度而改变, p 随气压而波动, 这会造成偶然误

收稿日期:2021-06-15;修回日期:2021-07-31

作者简介:肖勇(1998—),江西九江市,曲阜师范大学物理工程学院 2017 级本科生.

通信作者:董键, E-mail: qfdongjian@163.com

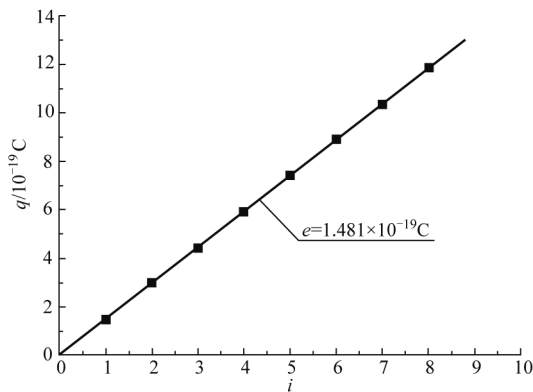


图2 油滴分组电量平均值的分布

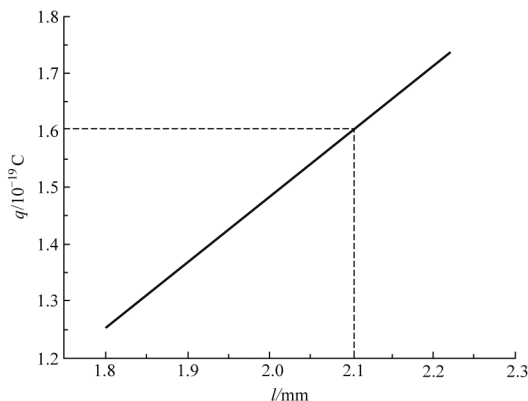


图4 对e与l关系的模拟计算

差,不是系统误差.电压 U 和时间 t 的测量会造成偶然误差,但它们的精度,经过校验,分别在 1 V 和 0.1 s 以内,不会造成那么大的系统偏差.重力加速度 g 采取当地的测量值, $g=9.797\text{ m/s}^2$,也不能导致那么大的偏差.最后,笔者怀疑是对油滴的计时距离 l 的取值出了问题.在说明书上,屏幕上分划板水平格线之间的垂直距离是 0.5 mm ,取4个格, $l=2\text{ mm}$,见图3,在计算电量时,就按 2 mm 代入的,这个值可能不对,也就是说,表面上看油滴是下落了4个格,但实际距离可能不是 2 mm .为了检验这个猜想是否正确,将 l 在 $1.8\text{ mm}\sim 2.2\text{ mm}$ 范围内取若干值,依次代入式(1)计算电量和求元电荷,结果见图4,距离 l 对元电荷的计算值有显著影响,当 $l=2.105\text{ mm}$ 时,对应的元电荷最接近 $1.602\times 10^{-19}\text{ C}$.

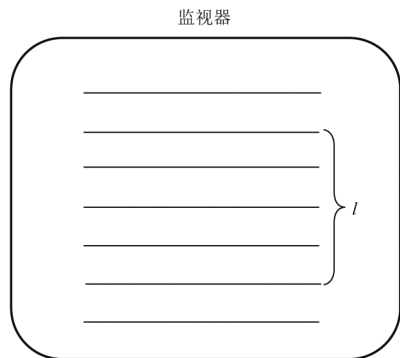


图3 监视器上分度线

那么,为什么油滴下落的表观距离与实际距离不一致呢?原因是:显微镜内置分划板刻度不准,与物镜焦距配合不协调,这可以用尺子来核对,实际观测到尺子的刻度缩短了,相应地,走过分划板上规定的距离被拉长.这在早期带CCD的油滴仪上很难避免.在后来批次的MOD5油滴仪上,显微镜不带分划板了,改在监视器屏幕上贴纸,上面画有分度线,

这样做,需要贴纸分度线与监视器的垂直偏转系统相协调,也不容易做到精确,难以长期保持稳定.另外,测量过程中,通常不会频繁调焦,油滴像模糊一点也凑合着测,此时油滴在焦点之外,视角变小,若在此处开始下落,距离在表观上被缩短,下落规定的距离被拉长^[3].

2 “李炜疆目标函数法”求元电荷

前面用电量的分组平均拟合法求得了元电荷 e ,方法自然而简单.下面再介绍另一种求元电荷的方法,笔者称之为“李炜疆目标函数法”(以下简称“目标函数法”).其思路是:理论上假定测量对象是某个值的整数倍,对该值呈周期性,但是,测量值又不精确再现这种周期,通过设计合适的“目标函数”,用统计方法求得该周期^[4].此法与各种拟合方法求函数参数有异曲同工之妙,值得在油滴实验中介绍和推广,以期与现行的油滴实验数据的各种处理方法相对照^[5-7].下面介绍“目标函数法”的用法.

“目标函数法”先要构造一个目标函数 φ ,形式如下:

$$\varphi(e) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{q_i}^2} \sin^2\left(\pi \frac{q_i}{e}\right) \quad (2)$$

它以元电荷 e 为自变量,求和遍及所有测量的油滴电量,总数是 N .式(2)中, σ_{q_i} 是电量 q_i 的标准差,它可以根据误差传递公式进行计算:

$$\sigma_q^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)^2 \sigma_t^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial U}\right)^2 \sigma_U^2 \quad (3)$$

其中 σ_t 表示时间 t 的标准差, σ_U 表示电压 U 的标准差. $1/\sigma_q^2$ 相当于权重,方差大的电量对求和贡献小.

由于时间 t 的测量与油滴所带电量多少无关,只与油滴大小有关,可以抓取任何油滴反复测量其

下落时间,得到不同平均时间下的标准差分布曲线,做法见文献[1],本文重新对其测量,拟合得到标准差分布函数为

$$\sigma_t=0.023\ 3t-0.001\ 24t^2+0.000\ 026\ 7t^3\quad(4)$$

至于 σ_U , 由于

$$U=\frac{m}{q}(gd)\quad(5)$$

与油滴的大小和所带电量的多少有关,对同一个 U ,可以有质量很不相同的油滴,它们的布朗运动有很大差异,导致 U 的起伏大小很不相同, U 的标准差很难测算, σ_U 只能估计,例如取电压表的测量精度 1 V, 或者根据实验经验,取不同时刻油滴偶然静止时的平衡电压差值的量级 10 V 代入计算,发现所得元电荷 e 的值对此并不敏感。

在以下讨论中,电量均去掉了 10^{-19} C 的量级。图 5 是取 $\sigma_U=1\text{ V}$ 时 $\varphi(e)$ 的约化分布曲线,图 6 是其低端横向放大图,两图结合,可以看出, $e>6.68$, 曲线单调下降,没有值得注意的结构存在。当 $e<6.68$, 曲线有多次振荡,有一系列“探底”的极小值,最深的极小值在 $e=1.479$ 附近,它很接近分组平均拟合法得到的元电荷 1.481,差别只有 0.13%,可以认为此处对应元电荷的值;从该点往左看,各极小值位置 e_i 见表 1, e_i/e_1 接近整数的倒数 $1/i$,表明这些位置对应 e_1 的分数电荷, e_1 是最大的电荷周期。可见“目标函数法”不仅能揭示元电荷的存在,还能揭示分数电荷的存在,这是电量数据隐含周期结构的必然结果。换言之,“目标函数法”不仅是计算元电荷的方法,同时也以独特的方式展示了电荷量子化。另外,能连续出现 6 个清晰的“探底”极值,表明电量的测量误差不大,所以,“目标函数法”还是检验油滴实验测量误差大小的“试剂”。

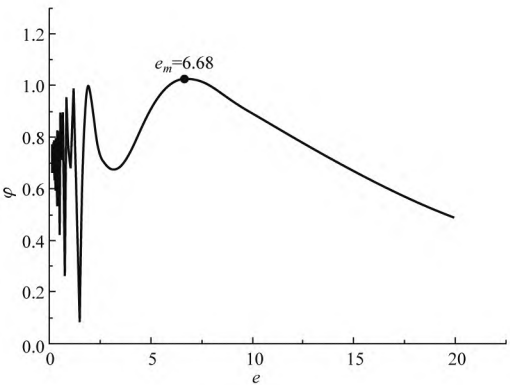


图 5 目标函数曲线概貌

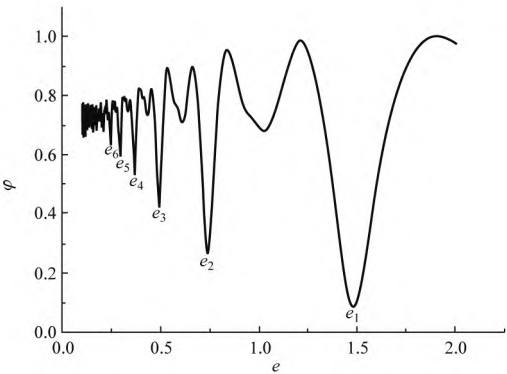


图 6 低端目标函数曲线

表 1 目标函数“探底”极值位置及其比值

e_i	1.4785	0.7389	0.4925	0.3695	0.2956	0.2461
e_i/e_1	1	0.4997	0.3331	0.2499	0.1999	0.1664

3 通过紫外线电离油滴证明电量量子化

油滴实验中,通过火花放电、紫外线或者激光,都可以改变油滴所带的电量^[8-10]。MOD5 型油滴仪上带有汞灯,对油滴进行了紫外电离的实验。根据测量经验,寻找带一个正电荷的油滴,测量其初始平衡电压 U_1 ,然后开启紫外灯,照射油滴,待油滴有了上升的迹象,停止照射,重新测量其平衡电压 U_2 ,然后再开启紫外灯照射油滴,如此反复,可以观察到油滴多次被电离的现象,记录每次电离后的平衡电压 U_i 。假设在实验过程中油滴的质量 m 没有变化,每次测量平衡时油滴的电量为 q_i ,则有

$$mg=q_1\frac{U_1}{d}\quad(6)$$

$$mg=q_i\frac{U_i}{d}\quad(7)$$

式(7)/(6)得

$$\frac{q_i}{q_1}=\frac{U_1}{U_i}\quad(8)$$

若电量是量子化的,则式(8)左端应为整数 k ,即 $\frac{q_i}{q_1}=k$,于是有

$$\frac{U_1}{U_i}=k\quad(9)$$

若式(9)成立,反过来就证明油滴电量是量子化的。为此,对 5 个油滴进行紫外电离的实验,所测量的平衡电压见表 2,比值 U_1/U_i 见表 3, n 是油滴编号。比

值分布见图 7,其呈现了明显的阶梯性,展现了电量量子化的又一种有效的证明方法. 过去只把紫外电离作用当做改变电量的手段,油滴实验还是按传统

方法进行,现在看来,只需测量平衡电压,就可以使电离实验成为证明电量量子化的新手段.

表 2 油滴每次电离之后的平衡电压分布

n	U_i/V									
1	385	194	131	98	65	55	38	33		
2	353	177	116	90	57	44	32			
3	356	185	122	88	61	43	35	29	21	
4	272	136	91	68	54	46	39	34	21	17
5	407	203	136	101	82	67	51	45	40	37 24

表 3 油滴初始平衡电压与电离之后的平衡电压比值

n	U_1/U_i									
1	1.0	1.985	2.939	3.929	5.923	7.001	10.13	11.67		
2	1.0	1.994	3.043	3.922	6.196	8.023	11.03			
3	1.0	1.924	2.918	4.045	5.836	8.279	10.17	12.28	16.95	
4	1.0	2.012	2.989	4.027	5.037	5.913	6.974	8.036	12.95	16.03
5	1.0	2.005	2.993	4.030	4.963	6.075	7.980	9.044	10.18	11.04 16.96

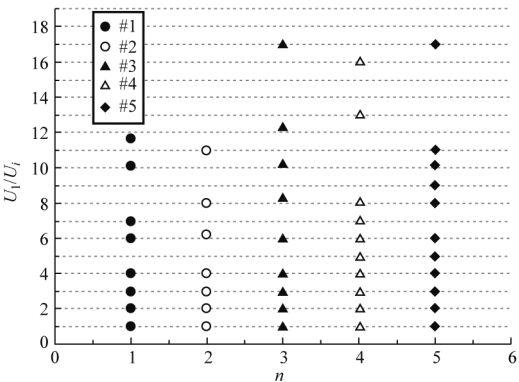


图 7 比值 U_1/U_i 的量子化分布

4 总结

油滴仪的设计存在缺陷,反映在元电荷测量值对国际推荐值的偏差上,可以通过模拟与电量有关的因素找到偏差的原因,其中,油滴实际下落距离误差的影响尤其显著,另一个影响因素是实验者疏于对油滴成像的调焦.

油滴仪上的紫外灯可以成为检验电量量子化的新手段,前提是要找到带一个电荷的油滴,对其逐次用紫外线进行电离,测量每次电离后的平衡电压,电压的比值隐含着量子性.

李炜疆“目标函数法”从油滴电量数据中提取元电荷,是揭示量子化的有效方法,该方法采用的“目标函数”概念有启发性. 使用“目标函数法”需要编程计算,因为电量的方差计算是复杂的,目标函数的计算也是复杂的,目标函数求极值也需要编程,如若编写程序供调用,将会是一种系统化的方法,可以快速得到元电荷的值,并检验测量数据的误差大小.

参考文献

[1] 董键.密立根油滴实验再认识[J]. 大学物理,2021,40(02): 36-41.

[2] 刘民,彭明.基本电荷量常数定值综述[J]. 计量学报,2020,41(03): 322-327.

[3] 刘智新,李慧娟,穆秀家. 密立根油滴实验人为操作引起的误差探析[J]. 大学物理,2008,27(04): 33-36.

[4] 李炜疆.密立根油滴实验数据处理的最优化方法[J]. 内蒙古工学院学报,1990(02): 54-58.

[5] 陈远容.油滴实验中数据处理的一种新方法[J]. 物理实验,1993,13(02): 54-55.

[6] 张风雷.关于密立根油滴实验的数据处理[J]. 丹东纺专学报,1998(3): 45-46.

[7] 方淑婷,鲁晓东.用 Mathematica 计算油滴电荷的基本量[J]. 大学物理实验,2016,29(03): 107-110.

[8] 李将禄,金春吉,孟庆元.用电火花改变密立根实验中

- 油滴荷电量[J]. 物理实验,1982,2(02): 61.
- [9] 潘人培.用 2537 埃紫外线改变密立根油滴的荷电量[J]. 大学物理,1986,5(05): 40-41.
- [10] 赵献章,陆同兴,卢秉嵩.用 3371 埃激光束改变密立根实验中油滴荷电量[J]. 物理实验,1980(02): 13-16.

Three problems in Millikan oil drop experiment

XIAO Yong, DONG Jian

(College of Engineering and Physics, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

Abstract: There are still many problems in Millikan oil drop experiment, such as the large deviation of the measured value of the elementary charge, the "objective function method" to solve the problem of the elementary charge, and the use of ultraviolet lamp on oil drops. If it is not handled well, the teaching effect should be affected. In this paper, the large deviation of the measured value of the elementary charge is considered to be related to the accuracy of the reticle of microscope and the fact that the experimenter does not focus on the oil drop image. The objective function method is of high precision in solving the elementary charge. The usage is sorted out and the difficulties are clarified. Ultraviolet lamp can be used not only to change the electric quantity of oil drop, but also to directly prove the charge quantization by starting from the oil drop with an elementary charge at the beginning, then measuring the balance voltage after each ionization and using the ratio of voltage.

Key words: Millikan oil drop experiment; elementary charge; objective function; ultraviolet ionization; charge quantization

(上接 50 页)

Analysis on development and evolution of college physics teaching research ——Visualization analysis based on CNKI

LI Jiao-jiao, ZHOU Yu-qing, DONG Ke, WANG Jia-ning

(School of Physics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: This article uses the content analysis method and the Cite Space software to collect and analyze journal papers related to college physics education and teaching research published in China between 2010 and 2020, in order to sort out the development and evolution of college physics education and teaching research in the past ten years. Through basic information processing, research hotspot presentation and frontier evolution analysis of the literature, the following conclusions are drawn: (i) in the field of college physics education and teaching, the output of papers is stable and continuous, but most of the scholars cooperate with their colleagues research within their own universities, and cross-university or cross-border cooperation is rare; (ii) the research hotspots of university physics are closely related to the development of the timelines; (iii) the dark lines of technology development and the government-oriented open lines "dominate" the change of research hotspots.

Key words: college physics education; research status; current situation investigation; content analysis