

DAXUE JINDAI WULI SHIYAN

大学 近代物理实验



000077168



四川大学出版社

大学近代物理实验

编著者(按姓氏笔划为序):

刘广仪 刘新民 罗宗德 罗惠德
孟庆朗 杨经国 谢吉正

四川大学出版社

责任编辑:杨守智 健 鹰 林嘉陵

封面设计:罗 光

技术设计:杨守智

图书在版编目(CIP)数据

大学近代物理实验 / 杨经国编著. —成都: 四川大学出版社, 1994.12 (2003.6 重印)

ISBN 7-5614-1125-1

I. 大... II. 杨... III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV.O41-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 051558 号

书名 大学近代物理实验

作者 杨经国
出版 四川大学出版社
地址 成都市一环路南一段24号 (610065)
印刷 新都华兴印务有限公司
发行 四川大学出版社
开本 780 mm × 1 092 mm 1/16
印张 15.75
字数 350 千字
版次 1994 年 12 月第 1 版
印次 2003 年 6 月第 2 次印刷
印数 1 001 ~ 1 400 册
定价 19.00 元

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电话:85408408/85401670/
85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回印刷厂调换。

◆网址:www.scupress.com.cn

版权所有◆侵权必究

前 言

《大学近代物理实验》是普通高等学校物理类专业学生继学习《普通物理实验》和《无线电电子学实验》后的一门重要的基础物理实验课程。它的内容主要涉及近代物理学发展中的著名实验和常用的实验方法与技术,具有较强的科学性和技术性。通过本课程的学习,帮助学生理解近代物理学中若干基本现象及规律;使学生在近代物理学各领域中的基本实验方法和技能方面得到全面训练;培养学生从事科学研究的必要理论及实践基础以及认真严肃的科学态度。近代物理实验课程历来受到学生及教师的高度重视,是各普通高校物理类专业的重点基础实验课程。

本书是在四川大学近代物理实验教研室所编讲义的基础上编写的。初稿始于 60 年代,80 年代以来,全室教师及实验技术人员共同努力,设计开出或改进了许多新实验(如正电子寿命谱、穆斯堡尔效应、质谱、激光拉曼光谱、激光技术、受激拉曼散射、受激布里渊散射、低温温度标定、光学多道分析器、微波及磁共振等),创造了许多新的实验方法,许多教学实验成果在国内外学术会议及各种学术刊物上公开交流发表,使本书内容得到很大提高。先后参加过本实验教材编写的还有杜坤麟、陈显祯、杨启刚、龙建国、任全积、汪思伯、赵汝权、冉瑞江等同志;凡在本教研室工作过的教师和实验技术人员为本教材的形成及各实验的建立与开出付出了大量艰辛劳动;四川大学物理系周仲璧先生一直关心本教材的编写与出版;《大学近代物理实验》教材是编著者和以上各位同志多年来共同成果的结晶,本教材正式出版之际特向上述各位同志致以衷心谢意。

《大学近代物理实验》内容包括了国家教委普通高校近代物理实验教学大纲所规定的主要必作实验及部分选作实验共 23 个选题。此外作为附录还包括了必要的误差与实验数据处理,常用物理常数等。全书内容丰富,文字精炼,是学习近代物理实验学生的必备教学用书,同时亦是从事近代物理实验工作的教师及实验技术工作者的良好参考用书。

目 录

实验一	密立根油滴实验	(1)
实验二	夫兰克—赫兹实验	(8)
实验三	塞曼效应实验	(16)
实验四	正电子湮没寿命谱	(23)
实验五	穆斯堡尔实验技术	(42)
实验六	光谱分析	(52)
实验七	钠原子光谱	(58)
实验八	固体激光技术(YAG 激光器)实验	(65)
实验九	激光拉曼光谱	(74)
实验十	受激拉曼散射(SRS)实验	(83)
实验十一	受激布里渊散射(SBS)实验	(89)
实验十二	光学多道分析器(OMA)实验	(95)
实验十三	微波测量	(100)
实验十四	电子自旋共振(ESR)	(109)
实验十五	铁磁共振(FMR)	(121)
实验十六	核磁共振(NMR)	(133)
实验十七	高真空的获得与测量	(150)
实验十八	真空镀膜	(163)
实验十九	激光椭圆偏振仪测量薄膜厚度和折射率	(173)
实验二十	质谱及残余气体分析	(187)
实验二十一	低温铂电阻温度计检定及计温法实验	(197)
实验二十二	半导体材料的霍尔系数及电导率测量	(206)
实验二十三	电子衍射实验	(215)
附录一	实验数据处理	(227)
附录二	常用物理常量表	(243)

实验一 密立根油滴实验

一、引言

人类对电荷的认识是逐步深入的,目前,我们知道电荷具有三个基本属性:一是所有电荷都分成正负两类;二是电荷守恒,即是在任何时刻,存在于一个孤立系统中的正负电荷的代数和保持不变;第三个基本属性则是电荷的量子化,就是说,在自然界中,电荷总以一确定的量 e 及其整倍数出现,人们称 e 为电子电荷。现代物理实验对基本粒子的测试表明,迄今一切已测定的带电的基本粒子的电荷都是精确地等于 e 或为其整倍数的。(有的基本粒子理论认为存在具有电荷为 $e/3$ 和 $2e/3$ 等所谓“分数电荷”的基本粒子,但尚未得到实验的确切肯定)。显然,电荷量子化是自然界一个极其深刻而普遍的规律。密立根油滴实验首先直接揭示了电荷量子化这一基本属性,并且精确地测定出电子电荷的大小,为现代电子论提供了直接的实验基础,对物理学的发展有重大意义。密立根油滴实验,设备简单而有效,方法巧妙,通俗易懂,所得结果精确可靠,堪称实验物理的典范。要做好这个本质上是简单的实验,在实验中必须把坚韧的精神和透彻的分析能力结合起来,这也是每个物理学工作者需要的基本素质。

本实验的目的是通过实验来验证电荷量子化,测出基本电荷的数值;初步学习计算机处理实验数据的方法及误差分析。

二、实验原理

密立根油滴实验是利用水平放置的平行板电容器,通过测定一个微小的带电油滴在该电容空间内,受重力作用在空气中匀速下落的速度,受电场力作用在空气中匀速上升的速度,计算出油滴所带电荷及其电荷的改变量。从而可以发现,它们均为某个最小电荷 e 的整倍数,该 e 值是个基本物理常数,称为电子电荷,或基本电荷。

当二水平极板未带电时,油滴受力情况如下:静止的油滴,由于表面张力而成球形,当油滴的运动速度不太高时,实验发现它们仍成球形,好似一个刚球体。该球体所受重力,方向朝下,大小为 $mg = \frac{4}{3}(\pi a^3 \rho g)$,受空气的浮力方向朝上,数值为 $f_{\text{浮}} = \frac{4}{3}(\pi a^3 \sigma g)$,其中 a 是球体的半径, ρ 、 σ 分别为油滴密度和空气密度,它们都是与温度 θ 有关的量,可以直接计算或查表得到,计算公式

图1 油滴受力示意图



$$\rho = 981[1 + 5.097 \times 10^{-4}(20 - \theta^\circ\text{C})]$$

$$\sigma = 1.2932(1 + 0.00367\theta^\circ\text{C})p/76$$

式中 g 为重力加速度,与地区有关,对成都地区 $g=979.4\text{cm/s}^2=9.794\text{m/s}^2$ 。油滴在重力与空气浮力作用下仍是加速下降,但因空气粘滞作用使小球受到阻力,该阻力同小球速度方向相反,与速度大小成正比,所以,下降一段距离后,小球将以均匀速度 v_g 运动,根据 *stokes* 定律,小球所受向上的阻力 $f_s=6\pi\eta av_g$,这时,小球所受各力达到平衡,即

$$\frac{4}{3}\pi a^3 g(\rho - \sigma) = 6\pi\eta av_g \quad (1)$$

由此可以得到

$$v_g = ga^2(\rho - \sigma)/(4.5\eta) \quad (1a)$$

$$a = [4.5v_g\eta/(\rho - \sigma)g]^{1/2} \quad (1b)$$

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho[4.5v_g\eta/(\rho - \sigma)g]^{3/2} \quad (1c)$$

式中 η 是空气的粘滞系数,与温度有关,可查 $\eta-\theta^\circ\text{C}$ 图线得到。(1a)式表明,油滴下降的稳定速度 v_g 与它的半径平方 a^2 成比例,油滴越小, v_g 也越小。由(1b)和(1c)式可见,只要测出 v_g ,便可以求得油滴的半径和质量。

当二水平极板上加上直流电压 U 时,若二板间距为 $d=0.005\text{m}$,在其空间形成的均匀电场强度 $E=U/d$ 。只要 E 足够大,方向合适,电荷量为 q_i 的油滴将上升运动。这时,油滴除受重力、浮力不变外,还受向上的电力 q_iE ,由于油滴向上运动,所受空气粘滞阻力 f_i 必向下,受力情况如图 1 所示。当油滴以稳定速度 v_e 上升时,满足运动方程式

$$q_iE - \frac{4}{3}\pi a^3 g(\rho - \sigma) = 6\pi\eta av_e \quad (2)$$

利用(1)式和(1b)式,由(2)式可以导出

$$q_iE = 6\pi\eta a(v_g + v_e) \quad (2a)$$

$$q_iE = 9\pi\sqrt{2v_g/g(\rho - \sigma)\eta^{3/2}}(v_g + v_e) \quad (2b)$$

如果所加电压 $U=U_{eq}$,使油滴静止不动即 $v_e=0$,则

$$q_i = \frac{9\pi d}{U_{eq}} \left[\frac{2\eta^3 v_g^3}{g(\rho - \sigma)} \right]^{1/2} \quad (2c)$$

(2c)式是所谓静态法计算油滴电荷的公式,需要测定的量是 U_{eq} 及撤去 U_{eq} 后油滴匀速下降的速度 v_g 。由于 U_{eq} 较难调准,对 q_i 精度有影响,有兴趣的同学可在实验最后阶段试一试。本实验采用动态法,由(2b)式计算油滴电荷。动态法有两方式:一是观测若干个不同油滴的运动,由测得的 v_g 、 v_e 及 U 求得对应于不同油滴的一组电量 $q_1, q_2, q_3, \dots$;另一种方式是监测一个油滴的运动,设法改变油滴的荷电量,也可求得一组电量 $q_1, q_2, q_3, \dots$ 。对同一油滴,当 E 不变时,油滴荷电量 q_i 与其速度 $(v_g + v_e)$ 成正比,所以,可由该速度来确定电荷 q_i ,若 $(v_g + v_e)$ 值是不连续的,则 q_i 就不连续即是量子化的。如果 $(v_g + v_e)$ 值存在最大公约数 $(v_g + v_e)_0$,则 q_i 必定存在公因素 e_0 ,即

$$e_0 = 9\pi \left[\frac{2}{g(\rho - \sigma)} \right]^{1/2} \eta^{3/2} v_g^{1/2} (v_g + v_e)_0 d / U \quad (2d)$$

若电荷果真是量子化的,那么不仅表现在油滴上所带电荷总量的不连续性且存在 e_0 上,而且,油滴上电荷的改变量也应是不连续的,其最小改变值 e_1 应与 e_0 值成比例。假若因为某

种天然的或人为的因素,使该油滴电荷量改变为 q'_i , 相应的上升速度变成 v'_e , 则由(2b)式可得

$$q'_i = 9\pi \left[\frac{2}{g(\rho - \sigma)} \right]^{1/2} \eta^{3/2} v_g^{1/2} (v_g + v'_e) d/U$$

于是电荷改变量为

$$\Delta q_i = (q_i - q'_i) = 9\pi \left[\frac{2}{g(\rho - \sigma)} \right]^{1/2} \eta^{3/2} v_g^{1/2} (v_e - v'_e) d/U \quad (3)$$

可见,油滴上电荷改变量 Δq_i 正比于 $(v_e - v'_e)$, 取 $(v_e - v'_e)$ 的最小值为 $(v_e - v'_e)_0$, 得到最小改变量电荷

$$e_1 = \Delta q_{\min} = 9\pi \left[\frac{2}{g(\rho - \sigma)} \right]^{1/2} \eta^{3/2} v_g^{1/2} (v_e - v'_e)_0 d/U \quad (3a)$$

倘若所有 $(v_g + v_e)$ 同 $(v_e - v'_e)$ 存在共同的最大公约数, 则可求得相应电量值 e , 油滴带电总量及其改变量均为量 e 的整倍数, 这便直接证明了电荷的量子化。

密立根在实验中发现, 当油滴半径 a 不是太小时, e 值是常数, 但随着油滴半径的减小, e 值却急剧增大, 这是什么原因呢? 原来, 在推导 Stokes 定律时, 假定了小球是在连续介质中运动, 当球体较大时, 空气可视为连续介质, 但当油滴的大小与空气分子的平均自由程 λ 可以相比时, 空气不能再认为是连续介质, 油滴在空气中的运动就会偏离 Stokes 定律, 因此, 可用空气的分子平均自由程与油滴半径的比值 λ/a 作为 Stokes 定律是否适用的判据, 如果 $\lambda/a \ll 1$, 定律适用, 否则必须修正。考虑到空气的不连续性, 修正后的粘滞力表示式改为

$$f_s = 6\pi\eta a v_g / (1 + A\lambda/a) \quad (4)$$

式中 A 为常数。根据气体分子运动论, 平均自由程 λ 与气体压强 p 成反比, 修正项 $A\lambda/a$ 可以改写成 b/pa , 这里, $b = 6.17 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{cmHg}$ 是一常数。于是修正后的结果表示如下

$$a = \left[\frac{4.5\eta v_g}{g(\rho - \sigma)(1 + b/pa)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$m = \frac{4\pi}{3} \left[\frac{4.5\eta v_g}{g(\rho - \sigma)(1 + b/pa)} \right]^{3/2} \rho \quad (6)$$

$$q_i = 9\pi \frac{d}{U} \left[\frac{2}{g(\rho - \sigma)} \right]^{1/2} \left[\frac{\eta}{1 + b/pa} \right]^{3/2} v_g^{1/2} (v_g + v_e) \quad (7)$$

要由(5)式直接求出 a 比较困难。若用 a_0 表示未修正时的(1b)式算出的半径, a 与 a_0 相差不大, 修正因子 b/pa 中的 a 可用(1b)式求得的 a_0 代替, 由(5)式得到:

$$a_1 = \left[\frac{4.5\eta v_g}{g(\rho - \sigma)(1 + b/pa_0)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

接着用 a_1 取代右边分母的 a_0 算出 a_2 , 再用 a_2 代替 a_0 算出 a_3 , ..., 一直算至 a_n

$$a_n = \left[\frac{4.5\eta v_g}{g(\rho - \sigma)(1 + b/pa_{n-1})} \right]^{1/2} = \frac{a_0}{\sqrt{1 + b/pa_{n-1}}} \quad (9)$$

若 $a_n = a_{n-1}$ 或满足条件 $\frac{|a_n - a_{n-1}|}{a_n} < 10^{-5}$, 即可认为 a_n 为 a 的足够精确的值。这种计算 a 的方法叫迭代法, 物理学中常用此法作近似计算。实验时测定油滴匀速运动速度的方法是先选定 l , 然后记录油滴下落及上升 l 的时间 t_g 和 t_e , 以确定相应速度 $v_g = l/t_g$ 和 $v_e = l/t_e$ 。

将(7)式变形以利程序计算

$$q_i = \frac{4\pi d}{3U} a_i^3 g(\rho - \sigma) \left(1 + \frac{t_e}{t_c}\right) \quad (10)$$

(8)~(10)式是本实验的主要计算公式。

三、实验方法与仪器

1. 仪器简介

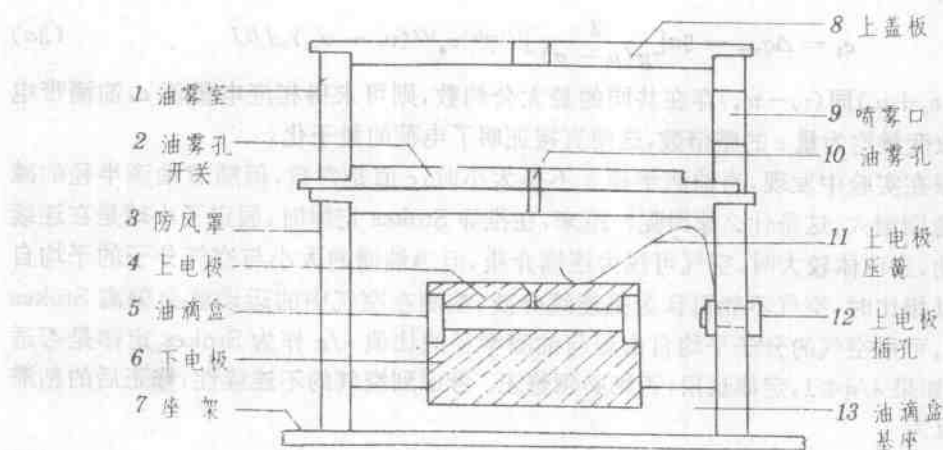


图2 油滴仪结构图

密立根油滴实验全套包括油滴仪、直流电源、电子秒表和喷雾器。仪器结构简介如下：

油滴仪由防风罩、油滴盒、照明装置、显微镜和水准仪等组成。整体固定在一块底板上，并由三只调节水平螺钉与电源箱连接在一起。结构示意图如图2。油滴盒5是由两块精磨的平行电极4和6组成，间距 $d=0.005\text{m}$ ，上电极板中央有一个直径 0.4mm 的小孔，供油滴落入。整个油滴盒装在有机玻璃防风罩3中，防止空气流动对油滴运动的影响。上部是油雾室1，用喷雾器从喷口9喷出油滴，经油雾孔10落入油滴盒，油雾孔开关2关闭后可防油滴继续落入油滴盒干扰观测油滴；照明装置灯珠功率小，有导光玻璃棒隔热，在棒与油滴盒之间紧贴盒边放一块薄玻片，防止棒入盒中且能减少空气对流。外加玻璃罩围住油滴仪，油滴盒中空气热扰动很小，保证油滴运动比较稳定。

显微镜是用来观察和测量油滴运动的。用显微镜观察时，在暗背景上的明亮油滴就象夜空的繁星。显微镜的目镜中装有一刻度标尺，共分六格，每格设计为视场中的 0.0005m （见图3），用它来测量油滴下降或上升的距离 l ，除以测出的时间，便可计算出油滴的运动速度 v_g 或 v_e 。

直流电源包括500伏“平衡”电压和250伏“升降”电压，均是连续可调。平衡电压数值可从电压表上读出来，标有“平衡电压”的拨动开关控制极板上的电压，开关在中间“O”位置时，两电极板短路接零电位，开关在“+”位置，能使带正电荷的油滴向上运动，反之，则

带负电荷的油滴上升。升降电压无读数,可通过“升降电压”开关迭加在平衡电压上,使静止油滴上升,只用于静态法。本实验另加有交流稳压电源,确保实验期电压恒定。

2. 实验方法

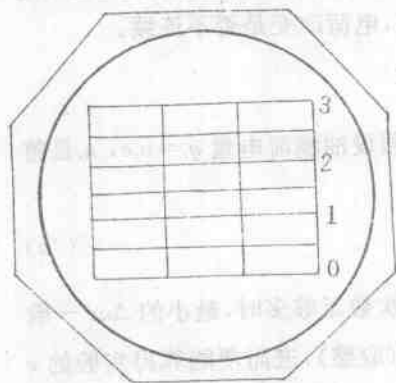


图3 显微镜目镜示尺图

(1)调节油滴仪 二极板一定要水平和平行,以保证电场强度 E 均匀并且与重力方向平行,否则,油滴几经上下运动就会斜飘向一方,离开显微镜的视场范围,使测试无法进行。调节的方法是,先转动调节螺钉,使水准仪之泡处于圆圈的中央位置;调节显微镜的目镜,使能清楚地看见镜内刻度尺;用喷雾器喷油,调节显微镜的轮子使油滴清晰,若油滴太暗,可转动照明灯座,使油滴明亮。注目观察一颗荷电油滴上下运动的轨迹,若在同一直线上便调节完成。

(2)选择油滴 当视场中出现大量清晰明亮的油滴后,加上“平衡”电压(+-均可)300伏或400伏,这时,一些带有上极板同符号电荷的油滴迅速下落,一些带相反电荷的油滴可能反抗重力而跃到上极板去,有少数油滴以较慢速度上升(显微镜中看见它们下落),我们需要的油滴正在它们之中。测试其中所选某油滴的上升速度 $v_{\uparrow}$,对 $v_{\uparrow} < 0.02\text{cm/s}$ 者,撤去电压再测其下降速度 $v_{\downarrow}$ (显微镜中看见它上升),若满足 $0.005\text{cm/s} < v_{\downarrow} < 0.02\text{cm/s}$ 条件,这种油滴容易看清楚,没有明显的布朗运动,运动速度较稳定,荷电量较少,能够准确地测定其速度;仔细调节显微镜使选中的油滴在视场中清晰明亮;关闭油雾孔门,阻绝新油滴继续落入视场中;让选中的油滴上下走几次来回,可以驱走其余油滴,视场中只剩下我们需要的那颗油滴,以便进行测试。

(3)测定油滴运动的均匀速度 $v_{\uparrow}$ 和 $v_{\downarrow}$ 确定油滴上的电荷需要测出三个量:一是在重力作用下,油滴在空气中匀速下落的速度 $v_{\downarrow}$,通过油滴匀速下落一段距离 l 所需时间 $t_{\downarrow}$ 算出。二是在电力作用下,油滴在重力场空气中匀速上升的速度 $v_{\uparrow}$,可用油滴匀速上升同一距离 l 所需时间 $t_{\uparrow}$ 求得。三是所加“平衡电压” U 。测量时间 $t_{\uparrow}$ 和 $t_{\downarrow}$ 时,为保证油滴的速度均匀,应先让油滴经过一段路程后再计时;选定测量距离 l 应该在平行极板之间的中央部分,即视场中格的中央部分。若太靠近上电极板,小孔附近有气流,电场也不均匀,若太靠近下电极板,油滴容易丢失。所以,一般取刻度尺的中间四格作为计时距离,但油滴运动范围可超过六格;由于 $t_{\uparrow}$ 和 $t_{\downarrow}$ 有较大涨落,对同一个油滴要作多次测量, $t_{\uparrow}$ 与 $t_{\downarrow}$ 的测量应交替进行,连测5—10组,然后求其平均,它们各自的相对误差小于2%为宜。应该注意的是,在测定 $v_{\uparrow}$ 时,若中途有明显的速度变化,说明油滴上电荷在途中发生了改变,此次数据应舍弃。

(4)改变油滴的电荷 油滴最初所带的电荷是从喷雾器射出时,油的扩散及摩擦产生的。有时空气中的离子与油滴碰撞可能改变所带电荷量,为了控制油滴电荷的改变,可以用弱 γ 源使空气电离。例如要使油滴获得正电荷,可先将油滴移至负电极附近,然后用 γ 射线使两极板间空气电离,正离子向负极运动。油滴被它们包围,碰撞使油滴获得正电荷。类似的可使油滴获得负电荷。对同一油滴,可以带不同量的电荷,这时, $v_{\downarrow}$ 不变, $v_{\uparrow}$ 却有完

全不同的值,用(3)式可以计算油滴上电荷的改变量 Δq_i 。但在同一油滴上进行这样的测量,对仪器调节要求较高,未经训练的实验者难以控制住油滴,因此,实验课中一般采用多个油滴进行测量。要求每组实验者至少测 8—10 组带不同电荷的油滴实验数据,经数据处理,可以验明不同油滴所带电荷是否为基本电荷的整倍数,电荷改变是否不连续。

四、实验结果及其处理

(1)对同一油滴改变电荷测出的数据处理方法如下:假设油滴荷电量 $q_i = n_i e$, n_i 是整数。对同一油滴,(7)式可改写成下式

$$n_i e = K \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_e} \right) \quad (7a)$$

两次电量之差 $\Delta n e = n_i e - n_j e = K \left(\frac{1}{t_n} - \frac{1}{t_j} \right)$ 。当带电量改变次数足够多时,最小的 $\Delta n e$ 一般就是基本电荷 e 值,由此可以求出油滴各次带电量之 n 值(取整),进而便能算得实验的 e 值。具体步骤是:首先由各个 $|1/t_n - 1/t_{n+1}|$ 相对大小找出 Δn , 计算 $\frac{1}{\Delta n} \left| \frac{1}{t_n} - \frac{1}{t_{n+1}} \right|$ 各个值及其平均数,得最小时间改变量 Δt_0 ; 第二步计算 $\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_e}$ 和 $n_i = \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_e} \right) / \Delta t_0$ (取整数); 第三步计算 q_i 及 $e_i = q_i / n_i$, 最后计算 $\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i$ 和平均标准偏差 $S_e = \left[\sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2 / N(N-1) \right]^{1/2}$, N 为测量次数。

(2)对多个油滴电荷量测量数据之处理方法:首先利用(8)式和(9)式,采用迭代法求出油滴半径 a_i ; 第二步用(10)式计算油滴的电荷 q_i ; 第三步将各个 q_i 从小到大排序,由 q_i 及 $\Delta q_i = q_{i+1} - q_i$ 找出最大公约数 e_0 (近似值),只要不同的电荷量 q_i 个数足够多, e_0 一般近似等于基本电荷 e ; 第四步由 q_i / e_0 四舍五入取整求出油滴含基本电荷个数 n_i , 进而得出 $e_i = q_i / n_i$, 最后计算基本电荷实验平均值 $\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i$ 和平均标准差 $S_e = \left[\sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2 / N(N-1) \right]^{1/2}$ 。整个计算可以编程序上计算机处理。

(3)处理结果应正确表示为下式

$$e = \bar{e} \pm t_\xi S_e \quad (\text{置信度 } \xi = \dots)$$

其中 t_ξ 可以查《 t_ξ 数值表》得到。

(4)对实验结果进行讨论,并作误差分析。

t_{α} 数值表(N 为测量次数)

$N-1$ ξ	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
95%	2.776	2.571	2.447	2.365	2.306	2.262	2.228	2.201	2.179	2.160	2.145	2.131	2.120	2.110	2.101
98%	3.747	3.365	3.143	2.998	2.896	2.821	2.764	2.718	2.681	2.650	2.624	2.602	2.583	2.567	2.552
99%	4.604	4.032	3.707	3.499	3.355	3.250	3.169	3.106	3.055	3.012	2.977	2.947	2.921	2.898	2.878

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	60	120	∞
2.093	2.086	2.080	2.074	2.069	2.064	2.060	2.056	2.052	2.048	2.045	2.042	2.021	2.000	1.980	1.960
2.539	2.528	2.518	2.508	2.500	2.492	2.485	2.479	2.473	2.467	2.462	2.457	2.423	2.390	2.358	2.326
2.861	2.845	2.831	2.819	2.807	2.797	2.787	2.779	2.771	2.763	2.756	2.750	2.704	2.660	2.617	2.576

参考资料

- [1] S. B. 史包尔斯基著, 周同庆等译, 原子物理学, 第一卷, 高等教育出版社(1959年, 北京)。
- [2] Harmwell and Livingwood, *Experimental Atomic Physics*. 上海龙门联合书局影印, 1933年初版。
- [3] Millikan, 电子 3—5章(钟间译), 商务印书馆出版(上海), 中华民国24年5月初版。
- [4] 李惕碛著, 实验的数学处理, 科学出版社(1980年, 北京)。

〔罗宗德〕

实验二 夫兰克—赫兹实验

一、引言

原子能级的存在,除了可由光谱研究推得之外(原子光谱中的每根谱线表示原子从某一较高能级向另一较低能级跃迁时的辐射),还可以用慢电子与稀薄气体原子碰撞的方法使原子从低能级激发到高能级,通过测量电子和原子碰撞时交换某一定值的能量,直接证明原子能级的存在,同时也证明原子发生跃迁时吸收和发射的能量是完全确定的,不连续的。1914年,德国人夫兰克(J. Franck)和赫兹(G. Hertz)首先完成了此实验。由于这项卓越的工作,他俩荣获了1925年的诺贝尔物理学奖金。

二、实验原理

玻尔(BOHR)的原子模型理论指出:原子只能较长期地处在一些稳定的状态(简称定态)中,原子处在该状态时,不吸收也不发射能量,各定态有确定的能量 $E_i (i = 1, 2, 3, \dots)$, 其数值是彼此分离的,不连续的。原子的能量不论通过什么方式发生变化,它只能使原子从一个定态跃迁到另一个定态;原子从一个定态跃迁到另一个定态而发射或吸收辐射时,辐射电磁波的频率是一定的,其大小由原子所处两定态之间的能量差决定,若用 E_n 和 E_m 代表有关两定态的能量, ν 代表辐射频率,则它们间满足如下关系

$$h\nu = E_n - E_m \quad (1)$$

式中,普朗克常数

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ 焦耳} \cdot \text{秒}$$

原子状态的改变通常在两种情况下发生,一是当原子本身吸收或放出电磁辐射时,二是当原子与其它粒子发生碰撞而交换能量时。能够改变原子状态最方便的方法是用电子轰击原子,电子的动能可用改变加速电位的方法加以调节。

处于正常态的原子发生状态改变时,其所需要的能量不能少于该原子从正常态跃迁到第一激发态时所需要的能量,此能量称为临界能量。当电子与原子碰撞时,若电子的能量小于临界能量,则发生弹性碰撞,即碰撞前后电子的能量几乎不变,而只改变运动方向。如电子的能量等于或大于临界能量,则发生非弹性碰撞,这时电子给予原子跃迁到第一激发态所需要的能量,其余的能量仍为电子所保留。若加速电位为 V , 则初速为零的电子在此电位的作用下所具有的能量为 eV (e 为电子的电荷)。当 V 值小时,电子和原子只发生弹性碰撞,当电位差等于 V_k 时,电子所具有的能量恰好使原子从正常态跃迁到第一激发态, V_k 称为第一激发电位,或临界电位或中肯电位

$$eV_k = E_2 - E_1 \quad (2)$$

式中 E_1, E_2 分别代表原子的正常态(基态)和第一激发态的能量,测定这个电位差 V_g ,就可据(2)式求出原子的正常态和第一激发态的能量差,继续增加 V 时,电子具有的能量就可逐渐上升到足以使原子跃迁到更高的受激态(第二、第三受激态等等),最后,到某一值 V_i 时,电子能量足以使原子电离, V_i 称为电离电位。

一般情况下,原子在受激态所处的时间不会很长,就会自动回到正常态,并以电磁辐射的形式放出以前所获得的能量。

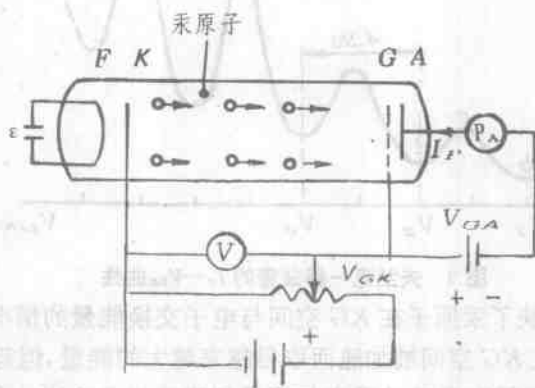


图 1

夫兰克-赫兹实验的原理如图 1 所示,图中上方为一专用充汞的夫兰克-赫兹管,由灯丝 F 加热的阴极 K 发出大量的电子作为慢电子的来源,阴极 K 和栅极 G 之间的电位差 V_{GK} 使从阴极出发的电子朝栅极加速,阴极至栅极的距离比较大,在适当的汞汽压下,这些电子与汞原子可发生多次碰撞,栅极 G 和极板 A 之间加有一反向拒斥电压 V_{GA} ,管内空间的电位分布如图 2 所示。

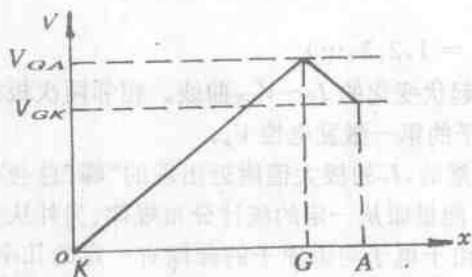


图 2

当电子穿过 KG 空间进入 GA 空间时,如果具有较大的能量($\geq eV_{GA}$)就冲过反向拒斥电场达到板极形成板流。为检流计(PA)检测,如电子在 G 附近与汞原子碰撞,把自己的一部分能量交给了汞原子而使后者激发的话,电子本身所剩余的能量就可能很小($< eV_{GA}$),以致通过栅极后已不足以克服拒斥电场而被折回到栅极,此时板极电流就显著下降。

实验时,逐渐加大加速电位差 V_{GK} 并仔细观察电流计的电流指示,如原子能级确实存在,而且正常态与第一激发态之间

有确定的能量差的话,就可观察到如图 3 所示的 $I_P \sim V_{GK}$ 曲线。

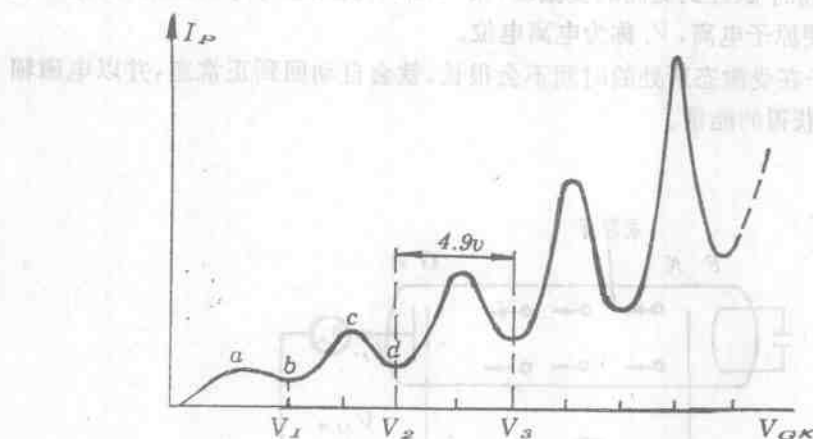


图 3 弗兰克-赫兹管的 $I_P \sim V_{GK}$ 曲线

图 3 所示之曲线反映了汞原子在 KG 空间与电子交换能量的情况。当加速电位 V_{GK} 由零逐步增加时,电子在 KG 空间被加速而取得越来越大的能量,但起始阶段,电压较低,电子获得的能量较小,即便在运动过程中与原子相碰撞也只有微小的能量交换(弹性碰撞),穿过栅极的电子所形成的极流 I_P 将随 V_{GK} 的增加而增加(如图 3 中的 $0a$ 段),直至 V_{GK} 等于或较大于汞原子的第一激发电位 V_g 时,电子在栅极附近与汞原子发生非弹性碰撞,几乎把自己全部的能量交给汞原子,使汞原子激发。这些电子由于损失了能量就不能克服拒斥电场而达到板极 A 。所以板极电流 I_P 将显著减小(图 3 ab 段)。继续增加 V_{GK} 在距栅极某一距离时,电子就已和汞原子发生非弹性碰撞,但因加速电场继续作用在电子上,电子抵达栅极时已具有足够的能量,即可克服拒斥电场的作用而达到板极 A ,此时电流又开始上升(图 3 中 bc 段),直到 KG 间电位差是二倍汞原子的第一激发电位即 $2V_g$ 时,电子在 G 附近又会经两次碰撞而损失能量,因而又会造成第二次板极电流下降(图 3 中 cd 段)。同理,凡在

$$V_{GK} = nV_g \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

的地方,板极电流 I_P 都会相应下降,形成规则起伏变化的 $I_P \sim V_{GK}$ 曲线。相邻两次板极电流下降(或峰值)所对应的电位差应该是汞原子的第一激发电位 V_g 。

实验中板极电流 I_P 的下降并非是完全突然的, I_P 的极大值附近出现的“峰”总会有一定的宽度,这主要是由于从阴极发出的电子之能量服从一定的统计分布规律。另外从实验曲线可看出,板极电流并不降到零,这主要是由于电子与汞原子的碰撞有一定的几率,当大部分电子恰好在栅极前使汞原子激发而损失能量时,总会有一些电子“逃避”了碰撞。

原子处于激发态是不稳定的,在实验中被慢电子轰击到第一激发态的原子要跳回基态,进行这种反跃迁时,原子是以放出光量子的形式向外辐射能量,这种光辐射的波长为

$$eV_g = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

对于汞

$$\lambda = \frac{hc}{eV_s} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-19} \times 4.9} \text{m} \\ = 2.5 \times 10^3 \text{\AA}$$

从光谱学的研究中确实观察到了这根波长为 $\lambda = 2537 \text{\AA}$ 的紫外线。

汞的第一激发电位较低(4.9 伏),因此,只需加 30 伏加速电压即可明显观察到约 5 个电流峰值;汞是单原子,而且有较强的原子量,电子与汞原子发生弹性碰撞时只损失很小一部分能量,这样,能量为 4.9eV 的电子与汞原子发生非弹性碰撞时,就可能把获得的能量全部传递给汞原子;充汞管的汽压可通过温度来控制,很易得到各种汽压下的实验值,由于以上原因,通常 $F-H$ 实验都在充汞管中进行。如管内充以其它元素,同样可测得它们的第一激发电位。钠的第一激发电位为 2.12 伏,钾为 1.63 伏,氦为 2.1 伏等。

实验中,充汞管需放在炉内加热,并维持适当的温度,该温度对电子与原子的碰撞过程有着关键性的影响,当温度改变时,汞的饱和蒸汽压发生改变,即汞蒸汽的密度发生改变,从而导致电子与汞原子碰撞平均自由程 $\bar{\lambda}$ 发生变化,在阴极——栅极间电场方向上,电子在一个平均自由程 $\bar{\lambda}$ 的路程中获得一份能量为

$$K = eE\bar{\lambda} \quad (5)$$

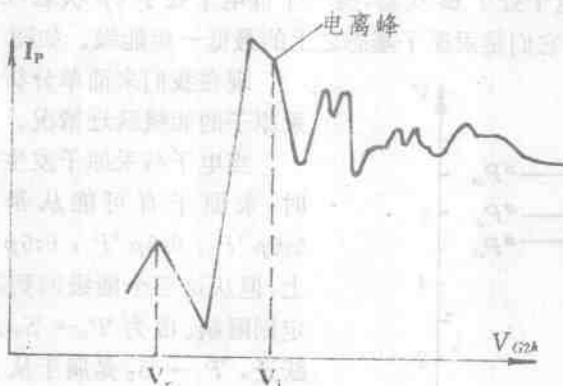


图 4

式中 E 为阴极——栅极间的电场强度、温度较高时, $\bar{\lambda}$ 较短(如 150°C 时, $\bar{\lambda}$ 约为 0.2mm), K 值较小,因而激发低能级机会大,相反,温度较低时, $\bar{\lambda}$ 较大(如 100°C 时, $\bar{\lambda}$ 约为 2mm), K 值比较大,一个电子在两次碰撞间就有较大机会获得足够的能量去激发高能级,甚至使原子电离。如果采用适当的管子和线路装置,在较低温度下就有可能进行较高能级激发电位或电离电位的测定。

若将温度控制在 100°C 左右,可用该管测汞的电离电位,所得 $I_p \sim V_{G2K}$ 曲线如图 4 所示(温度控制在 150°C 时,可测得汞的第一激发电位)。

电离电位用第一峰(4.9V)定标,以修正接触电位差的影响。电离电位 $V_i = V'_i - \Delta V$,

一般 ΔV 取 $1.7 \pm 0.5V$ 。

下面谈谈汞原子的有关能量状态问题。

在描写具有多个价电子的原子状态时,可采用总自旋量子数 S , 总轨道量子数 L 和总角动量量子数 J 。汞原子最外层有两个价电子,原子实的轨道角动量、自旋角动量和总角动量都等于零,因而价电子的那些角动量也就等于整个原子的角动量,价电子的诸量子数也就可以用来描述整个原子。正常情况下,汞原子的两个价电子都处于 $6s$ 态,即一个价电子的 $n_1=6, l_1=0$, 另一个价电子的 $n_2=6, l_2=0$ 。当汞原子被激发时,常常出现的情况是:一个电子始终处于 $6s$ 态,另一个电子可能受激而处于较高能级。这样,汞原子的总轨道量子数 $L=L_2$, 总自旋量子数 S 可以有两种情形:当两个价电子的自旋方向相反时, $S=\frac{1}{2}-\frac{1}{2}=0$, 当两个价电子的自旋方向相同时, $S=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}=1$ 。当 $S=0$ 时,总角动量量子数 $J=L+S=L$, 只有一个数值,与这状态对应的光谱项是单项。当 $S=1$ 时,对每个 L 值($L=0$ 除外),都有三个可能的 J 值与它对应,即 $J=L+1, L, L-1$, 与此对应的是三重项。随着轨道量子数的不同,即对应于 $L=0, 1, 2, 3 \cdots$ 的项,分别用大写字母 $S, P, D, F \cdots$ 等来代表原子态,并在符号左上方用数字表示该项的重数,如“1”表示单项,“3”表示三重项。符号的右下方用数字表示量子数 J 的数值。为了更完全地描述,再把两个价电子的符号写在原子状态符号的前面,例如: $6s6s\ ^1S_0$ ——表示汞原子的两个价电子均处于 $6s$ 状态, $L=0, S=0, J=0$, 该状态即为汞原子的基态(单态); $6s6p\ ^3P_0, 6s6p\ ^3P_1, 6s6p\ ^3P_2$ 表示汞原子中的一个价电子处于 $6s$ 状态,另一个价电子处于 $6p$ 状态, $L=1, S=1, J$ 分别等于 $0, 1, 2$ (三重态)。它们是汞原子基态之上的最低一组能级。如图 5 所示。

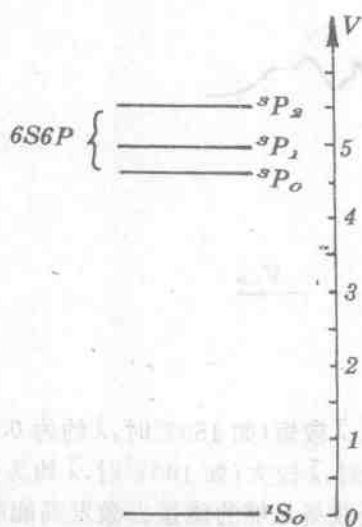


图 5 汞原子基态之上的最低一组能级

现在我们来简单分析一下实验过程中汞原子的能级跃迁情况。

当电子与汞原子发生碰撞而交换能量时,汞原子有可能从基态分别跃迁到 $6s6p\ ^3P_0, 6s6p\ ^3P_1, 6s6p\ ^3P_2$ 这三个能级上,但从这三个能级回到基态时要受选择定则限制。因为 $^3P_2 \rightarrow ^1S_0$ 是属于 $\Delta J=2$ 的跃迁, $^3P_0 \rightarrow ^1S_0$ 是属于从 $J=0$ 到 $J=0$ 的跃迁,根据量子数 J 的选择定则,这两者都是被禁止的,所以 3P_0 和 3P_2 是亚稳态能级,即在没有外界影响的情况下,处在 3P_0 和 3P_2 上的原子不能以电磁辐射的形式自动回到基态 1S_0 ,因而会长时间地停留在亚稳态能级上。而 $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$ 是一个允许的跃迁,也就是说 3P_1 不是亚稳态,处在 3P_1 的

原子将会很快以辐射跃迁的方式回到基态。

与实验中测得的汞原子第一激发电位相对应的究竟是基态与哪一个能级之间的跃迁呢? 让我们进一步分析电子朝栅极加速过程中的一些细节。假设起初所有的汞原子都处