实验一　氢原子光谱

十九世纪后期，光谱学得到很大发展。1853年有人在氢火花中观察到氢红线，继而从星体光谱中发现了一系列氢原子谱线。 1915年伍德（Wood）用低压气体放电管通过氢气放电拍摄氢光谱。巴耳末（J·J·Balmer）对上述谱线进行归纳，得到以下关系：

$$\lambda = B\frac{n^2}{n^2-4} \qquad (1)$$

式中，$B=3645.7\text{Å}$，$n=3, 4, 5, \cdots$等正整数。

由（1）式算得的波长λ值与实验测得的H_α、H_β、H_γ、H_δ等谱线的波长值一致；当$n\to\infty$时，$\lambda\to B$，二相邻谱线的波长差趋近于零。（1）式称为巴耳末公式。符合巴耳末公式的一组氢原子光谱线，称为巴耳末系。

巴耳末公式还可以用波数表示：

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad (2)$$

式中$R=4/B$，称为里德伯(Rydberg）常数。巴耳末还预言将上式2^2换成其它整数平方后，可以得到氢原子光谱的其它线系。实验证明了巴耳末的预言。这样所得的关系式为：

$$\tilde{\nu} = R_H\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad (3)$$

$m=1, 2, 3, \cdots$; $n=2, 3, 4, \cdots$。 $(m<n)$。

$m=1$，$n\geqslant 2$，为赖曼(Lyman）系；

$m=3$，$n\geqslant 4$，为珀邢(Paschen）系；

$m=4$，$n\geqslant 5$，为布拉开(Brackett)系；

$m=5$，$n\geqslant 6$，为普芳德(Pfund)系。

通过实验及实验所总结的经验公式，可以看出氢原子光谱具有以下特点：

（1）光谱是线状的，有确定的波长值，而且谱线的波长值是分立的；

（2）谱线之间有一定的关系，构成谱线系，可以用公式表示它们的波长；

（3）每条谱线的波长可以表达为两项之差。

上述特点所表示的氢原子的规律性无法用古典理论解释。根据卢瑟福(Rutherford)的原子模型，电子在原子中绕核运动。这种加速运动的电子不断辐射能量。辐射频率等于电子绕核转动频率。原子能量因此要逐渐减少，轨道半径逐渐变小，辐射频率也要逐渐改变，因此原子所发射的光谱应该是连续的。同时电子逐渐接近原子核，最终落在核上。这些推论都与实验事实不符。这些矛盾使古典理论遭到一次严重危机。

为解决这一困难，玻尔（Bohr）于1913年提出自己的氢原子理论。他以卢瑟福模型为基础，应用库仑定律和牛顿定律，并且将普朗克（Planck）量子论用于原子系统，使

需要全本请访问 www.ertongbook.com

氢原子光谱规律得到初步解释。玻尔理论得到的原子总能量

$$E_n=-\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2n^2h^2}\qquad n=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ \cdots \tag{4}$$

在（ 4 ）式中，m为电子质量；e为电子电量；ε_0为真空介电常数；h为普朗克常数．E_n有分立的确定值，这就是说，玻尔认为原子处于一些分立的稳定状态；原子从一个稳定状态跃迁到另一个稳定状态时，能够发射或吸收单色光。发射光的频率为

$$\nu_{kn}=\frac{E_n-E_k}{h}=\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2h^3}\left(\frac{1}{k^2}-\frac{1}{n^2}\right) \tag{5}$$

令

$$R=\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2h^3c} \tag{6}$$

则波数

$$\tilde{\nu}_{kn}=\frac{\nu_{kn}}{c}=R\left(\frac{1}{k^2}-\frac{1}{n^2}\right) \tag{7}$$

（ 7 ）式形式上与巴耳末公式一致。将（ 6 ）式中 $c=2.997925\times10^8$米／秒及其它有关物理常数代入，算得$R=1.0973731\times10^7$米$^{-1}$。这与实验测得的里德伯常数符合得很好（ R的实验值为1.0967758×10^7米$^{-1}$）。这样，波尔理论就成功地解释了氢原子光谱。但玻尔理论也有严重的缺陷，它以古典理论为基础，却又引入了与古典理论相抵触的假设；它只解释了谱线的频率。却无法解释谱线的强度、宽度等一系列问题。玻尔理论的成功与不足都给人们以很大的启发。它促成薛定谔（Schrödinger）、海森伯（Heisenberg）等人于1926年建立起描述微观粒子规律的完整理论体系 —— 量子力学。

玻尔理论给出的里德伯常数表达式（ 6 ）在推导中认为原子核静止不动，只是电子绕核转动，这就意味着把核的质量看成是无穷大的。而实际情况是原子核与电子都围绕公共质心运动．所以公式（ 6 ）应表达核质量无穷大的里德伯常数，记作

$$R_\infty=\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2h^3c} \tag{8}$$

将式中m换成折合质量 $\mu=\frac{mM}{m+M}$，则得到实际原子的里德伯常数表达式

$$R_A=\frac{\mu e^4}{8\varepsilon_0^2h^3c}\Big/\left(1+\frac{m}{M}\right)=R_\infty\Big/1+\frac{m}{M} \tag{9}$$

（ 9 ）式适用于各种原子。由于M值不同，不同原子的R_A值不同。测得氢原子的R_A值后，可由（ 9 ）式确定R_∞值。由R_∞值又可反过来确定其它原子的R_A值。

近年来，高分辨激光光谱技术大大提高了谱线波长的测量精确度，从而使里德伯常数的测量精确度也显著提高．由氢原子光谱测得里德伯常数的最新结果为$R_\infty=109737.31476\pm0.00032\text{cm}^{-1}$。目前公认值$R_\infty=109737.3177\text{cm}^{-1}$。

【实验目的】

1.学习光谱实验技术：用摄谱仪摄谱；用铁谱比较法（内插法）测量谱线波长。

2.了解光谱实验与物理学发展关系的历史；验证巴耳末公式：用巴耳末公式测定氢原子的里德伯常数.

【实验原理】

1.摄谱：用摄谱仪摄谱是最基本的光谱记录方式。摄谱仪按分光方式可分为棱镜摄谱

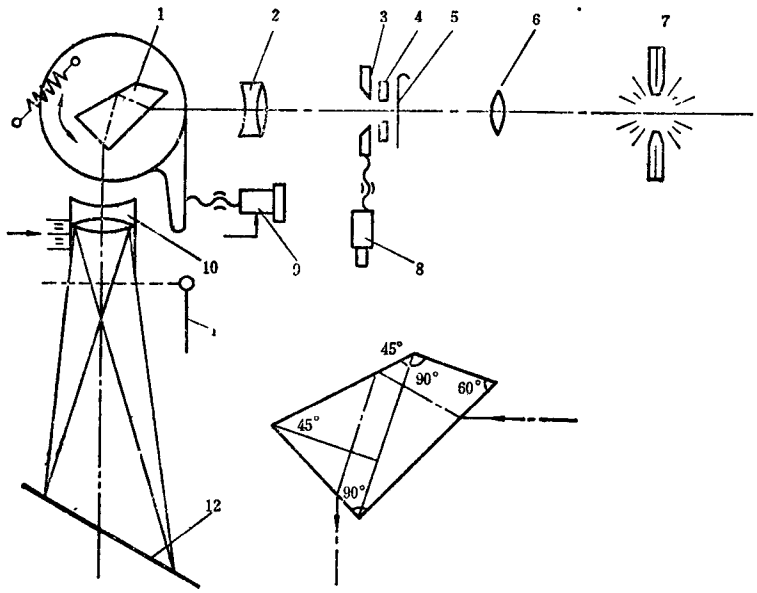


图 1-1 小型摄谱仪光路图

1—分光棱镜；2—平行光管透镜；3—狭缝；4—哈特曼光阑；5—挡板；6—聚光镜；7—光源；8—狭缝宽度调节鼓轮；9—棱镜位置调节鼓轮；10—透镜；11—曝光开关；12—底板

仪及光栅摄谱仪两种。本实验选用小型棱镜摄谱仪，其光路及基本结构如图1-1所示。

原子（或分子）发射的辐射光经透镜6聚焦到摄谱仪的狭缝上并射入狭缝。进入狭缝的光经平行光管变为平行光，然后经棱镜分光，以不同角度从棱镜中射出单色平行光。它们经透镜10会聚到底板12的不同位置上，形成一条条按波长排列的谱线。对于摄谱仪这一光学系统，每条谱线都是狭缝在底板上呈的象。因此为了得到清晰、细锐的谱线，应该在摄谱时选择适当的狭缝宽度。

摄谱仪调整好以后，影响摄谱质量的主要因素是曝光量。曝光时间的选择与光源情况、聚光情况及底片性质等因素有关。具体参数由实验确定（参看实验室提供的数据）。

为得到样品的发射光谱，首先应使样品气化，然后使呈气态的原子激发。激发方式很多，如热激发、共振吸收激发及外加电场引起的碰撞激发等等。经常使用电弧发生器作为摄谱光源。本实验采用的低压交流电弧发生器的电极之间加220伏的交流电压为电弧提供能量；同时还加有高频高电压，其作用是使电极间空气击穿以引燃电弧。在电弧区，气化的样品原子具有很高的热运动速度。这样一来，原子之间就会发生非弹性碰撞，使某些原子吸收其它原子的动能由基态跃迁到激发态。

对气体原子的激发采用放电管。将玻璃管抽真空后充入样品气体。在玻璃管两端装有电极。当二电极间加上几千伏的高电压后，管内气体放电。气体原子或离子在导电的过程中受到碰撞，从而被激发。本实验采用的氢放电管如图1-2所示。

3.用铁谱比较法测量未知谱线波长

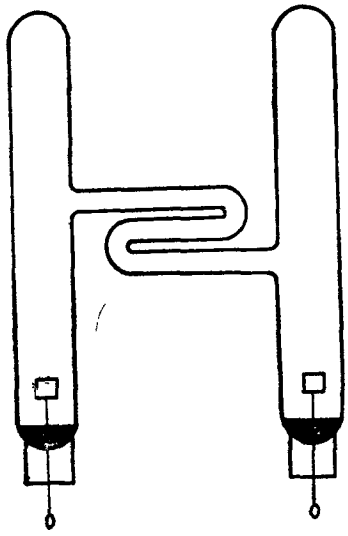


图 1-2　氢放电管

铁谱在4000Å～6600Å波长范围内有4600多条谱线，这些谱线的波长已经由光谱工作者精确地测定，铁光谱经过放大印成谱图，称为铁谱图．铁谱图上标有每条铁谱线的波长。

将铁谱与氢原子光谱并列拍摄在同一底板上，铁谱线的波长可对照铁谱图查出，让未知波长的氢原子谱线与其邻近铁谱线比较，就可以用铁谱作为“尺子”量出未知谱线的波长。

氢原子谱线与铁谱一般不会完全对齐，二者间距所相应的波长差可由线性内插法确定。当二谱线间距很小时（波长差很小），可以忽略棱镜线色散率随波长的变化，认为底板上谱线间的距离与其间的波长差成正比。因此位于波长为 λ_1 与 λ_2 的两条铁谱线之间的氢谱的波长 λ_x 可由下式计算：

$$\lambda_x=\lambda_1+\frac{\lambda_2-\lambda_1}{d}x \qquad (10)$$

(10)式中 d 为谱板上波长为 λ_1 与 λ_2 的两条已知铁谱线间距，x 为未知氢谱线与 λ_1 铁谱线间距，见图1-3。

为了将铁谱与样品谱并列拍摄，需要使用哈特曼光阑。哈特曼光阑由三个方孔组成，如图1-4所示。左右移动光阑，可以使三个孔与狭缝不同部位对正，从而实现两种谱的并列拍摄．

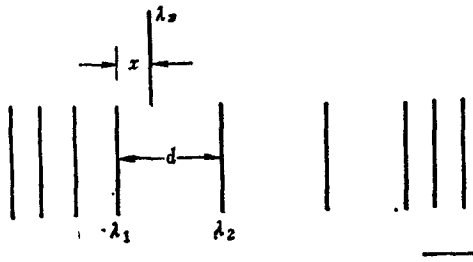


图 1-3　未知谱线波长的测定

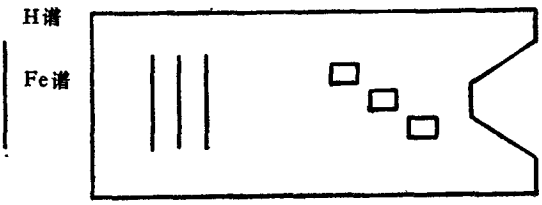


图 1-4　哈特曼光阑

【实验内容】

1.摄谱：用哈特曼光阑并列拍摄氢原子光谱及铁光谱，为使氢谱的弱线拍得清晰，而强线又不至于过粗，应选用不同曝光时间拍摄两组（每组都包括铁谱）　。

2.冲洗底板（显影、定影、冲洗、吹干）。

3.观测光谱：用映谱仪观察你所拍摄的光谱。首先熟悉映谱仪及比长仪的结构及应用方法，然后完成以下任务：①识别铁谱：从长波端开始将铁谱图逐张与你所拍摄的底板上

的铁谱对照，记下每张铁谱图对应的谱板位置。 ②观察氢光谱。在映谱仪上用卡尺粗测、粗略估算每条氢光谱的波长。③用比长仪精确测定一条氢谱线的波长，要求测量 5 次以上，并计算误差 。

4.数据处理：

（ 1 ）从粗测氢谱线的波长，求出其倒数。寻求合适的n值，使$1/\lambda$和$1/n^2$尽可能呈线性关系（由巴耳末公式(2)）。验证所选的各个n是否为3、4、5等连续整数并看一下实验曲线$1/\lambda$-$1/n^2$与线性关系的吻合程度。注意：由于波长λ值可以测得很精确，其它的计算及画图都必须有相应的精确度。计算可用计算器或计算机进行。

（ 2 ）用精确的波长测量值测间距用比长仪）及其对应的n值代入公式(2)，求出氢原子的里德伯常数R_H① 。由λ的测量误差计算R_H的测量误差。与公认的R_H测量值比较。

【实验技术】

（ a ）为使实验顺利进行，你应该参照实验室提供的数据资料制定一个摄谱操作程序，内容应包括：①狭缝宽度；②哈特曼光阑孔号（哈特曼光阑见图1-4)；③曝光时间；④电弧电流等。

（ b ）检查一下摄谱仪的状况，如暗盒的倾斜位置，聚焦透镜的位置等是否合乎规定。如有错动请老师帮助恢复。熟悉摄谱仪各部分的性能及操作技术。譬如电极的安装与调整，狭缝的调节，暗盒的装卸等。在此基础上作一次摄谱预演（不装底板）。预演中检查：①曝光时间控制得是否准确？②光源是否准确聚焦到狭缝上？③电弧电流是否稳定？

（ c ）制定摄谱程序时应该注意用改变哈特曼光阑孔的方式而不用板移来拍摄对照的氢谱和铁谱，想一下这样做的必要性；在拍摄一组对照光谱的过程中，暗盒如果发生错动，会产生什么结果？怎样处置。

（ d ）装卸底板应在暗室中进行。在此之前应在明处用照过的底板作装卸练习。学会在暗室中判别底板的乳胶面；想一下，乳胶面应朝向那一边？如果装反了会产生什么结果？

（ e ）冲洗底板，用与底板配合的指定显影液与定影液、严格控制显影液温度与显影时间。此外还应注意乳胶面朝上放在显影盆中，以免损伤乳胶面。

（ f ）用映谱仪看谱时，谱板乳胶面朝上。比长仪的结构及使用见附录。

【附录】比长仪

比长仪是一种精度较高的测长仪器（见图1-5)。它有两个显微镜、左边是看谱显微镜，右边是读数显微镜。显微镜下的载物台，可以手推粗动，也可以转动微动轮而微动（此时要旋紧制动螺丝）。主标尺（每格 1 毫米）固定在置片台右侧，可随载物台左右移动。副标尺分10格，每格0.1毫米，固定在读数显微镜上，不随载物台移动。

① 实验是在空气中进行的，因此 λ 的测量值是氢原子谱线在空气中的波长。严格地讲，在计算R_H时，应取真空中的波长。否则将产生一系统误差。由空气折射率（$n=1.00029$）可以推算出此系统误差值约为0.03%。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

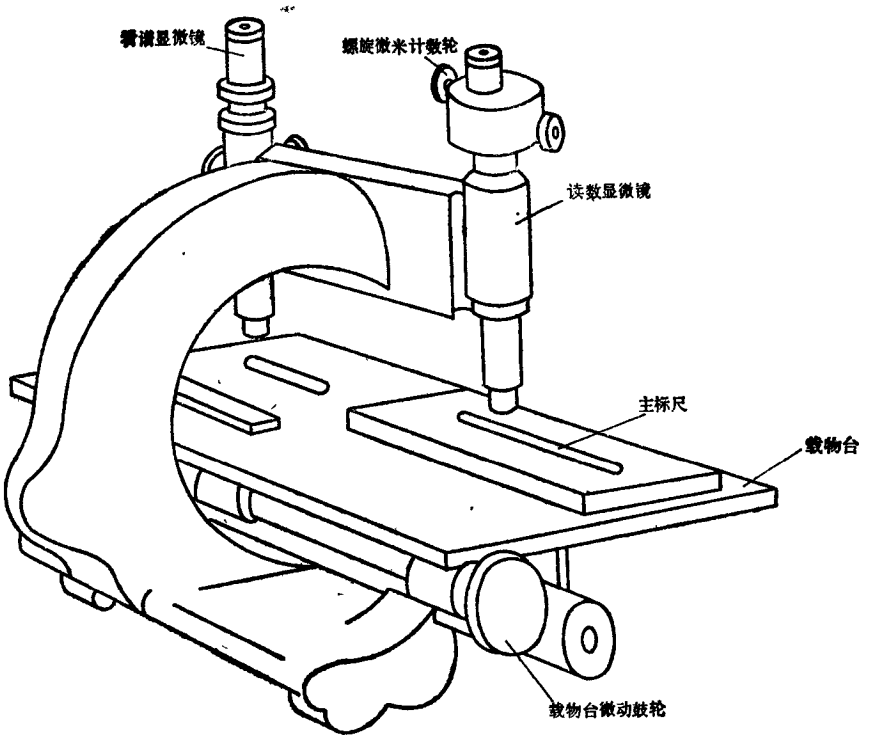


图 1-5　比长仪的外形图

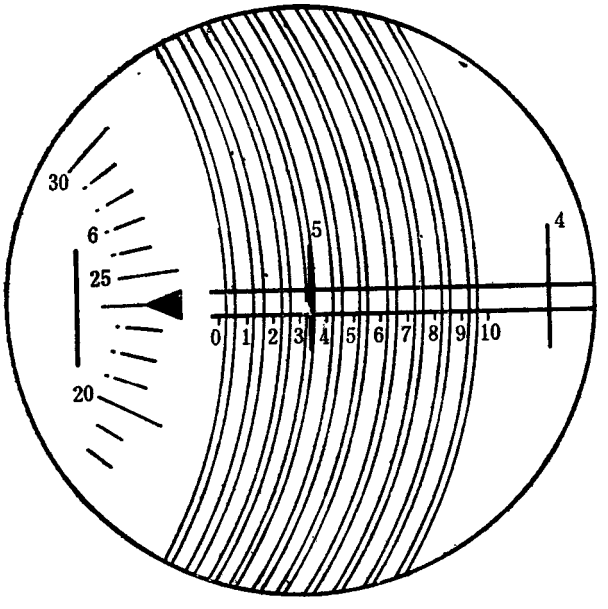


图 1-6　比长仪读数显微镜的视场

当主标尺与副标尺的零线对齐时，载物台与读数显微镜的相对位置为零位置。因此，进行测量时，主副二标尺的零刻度线间的距离表示载物台相对于零位置移动的距离。此距离的读数由主标尺、副标尺及螺旋微米尺给出。

螺旋微米尺装在读数显微镜上，其读数部分为十组螺旋双线及一圆形刻度尺。可在读数显微镜的视场里看到（见图1-6）。当转动螺旋微米尺的鼓轮时，从视场中可见到，圆形尺相对于副标尺端部的箭头转动，与此同时，螺旋双线相对于标尺刻度移动。可以将螺旋线转至与副标尺的刻度一一对齐。此时副标尺的每条刻线一一夹在十组双线之间；副标尺左端的箭头恰指圆形尺的零位置。螺旋双线相对于副标尺移一小格（0.1mm）时，圆形尺恰好转一圈（100个分度），因此圆形尺的最小刻度为1微米。

使用比长仪测谱线间距时，将谱板放在载物台左侧，移动台子，使看谱显微镜的叉丝与所测的某条谱线对齐，固定载物台，由读数显微镜读出此位置的读数。读数方法可参照图1-6说明。图中主副尺零刻度距离在5.3mm与5.4mm之间。多于5.3mm的部分由螺旋微米尺读出。读出方法如下：转动微米尺鼓轮，使螺旋双线与主尺刻线5对齐，此时圆形尺的读数24.0即为所需读数。置片台此位置的读数5.3240mm可视为所测谱线坐标值。

实验二　弗兰克-赫兹实验

玻尔发表原子模型理论后的第二年(1914年），弗兰克(J·Franck) 和赫兹(G·Hertz)用慢电子碰撞稀薄气体原子的方法，把原子从低能态激发到高能态。他们对电子与原子碰撞能量交换规律的研究，直接证明了原子内部能量的量子化。后来他们又在同样的实验中测得被慢电子激发的原子返回基态时辐射的光频率，发现这种辐射服从玻尔假设的频率定则。因此，弗兰克-赫兹实验就成为玻尔理论的一个重要实验依据。他们的这项工作获得了1925年度的诺贝尔物理学奖金。

【实验目的】

测定汞原子的第一激发电位，证明原子能级的存在。

【实验原理】

量子理论认为原子处于一系列不连续的能量状态。这些状态具有分立的确定的能量值，称为定态。原子从一个定态向另一个定态的过渡称为跃迁。跃迁伴随着电磁波的辐射或吸收。电磁波的频率ν可由发生跃迁的二定态能量E_m、E_n确定，它们之间的关系为

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

式中h为普朗克常数。

原子在正常情况下处于基态（低能态）。当原子吸收电磁波或受到其它具有足够能量的粒子碰撞时，可由基态跃迁到能量较高的激发态。从基态跃迁到第一激发态所需的能量为临界能量。本实验用电场加速电子，并使运动的电子与汞原子发生碰撞。当碰撞前电子的能量小于汞原子激发的临界能量时，碰撞后电子不损失能量。这种碰撞可视为二质量相差悬殊的物体间发生的弹性碰撞。如果碰撞前电子的动能大于汞原子激发的临界能量，通

过碰撞它可以把数量的$\Delta E=E_2-E_1$的能量交给汞原子，本身只保留剩余部分。这种碰撞可视为非弹性碰撞。设电子被加速前初动能为零，被加速到汞原子的临界能量所需外加电压U_0称为汞原子的第一激发电位，如果以e表示电子电荷则$eU_0=E_2-E_1$。

实验中，电子与原子的碰撞在密封的玻璃管中进行。管子密封前抽真空后充汞，管中装阴极、栅极及阳极。这种实验用的真空管称为弗兰克-赫兹管。

实验基本装置如图2-1所示。弗兰克-赫兹管放在控温加热炉中。实验温度在120℃～200℃内取值。在实验温度下，管中汞由液态变为气态。在热阴极K与栅极G之间加电压U_{GK}。在电场作用下，从阴极K发出的电子，在KG空间向栅极加速运动。在G与板极A之间加一较小的反向电压U_{AG}，此电压使电子受到阻力。通常称此电压为拒斥电压。弗兰克-赫兹管内极间电位分布见图2-2。当电子由KG空间进入GA空间时，如果电子的动能足够大，电子就能冲过拒斥电场达到A，形成阳极电流。如果电子在KG空间与汞原子发生了碰撞，并把自己的一部分能量交给汞原子，电子所剩余的动能就可能很少。这类电子就不能越过拒斥电场区GA，达不到阳极A，不能形成阳极电流。如果这类参与了原子激发的电子很多，微电流计中的电流将显著地下降。

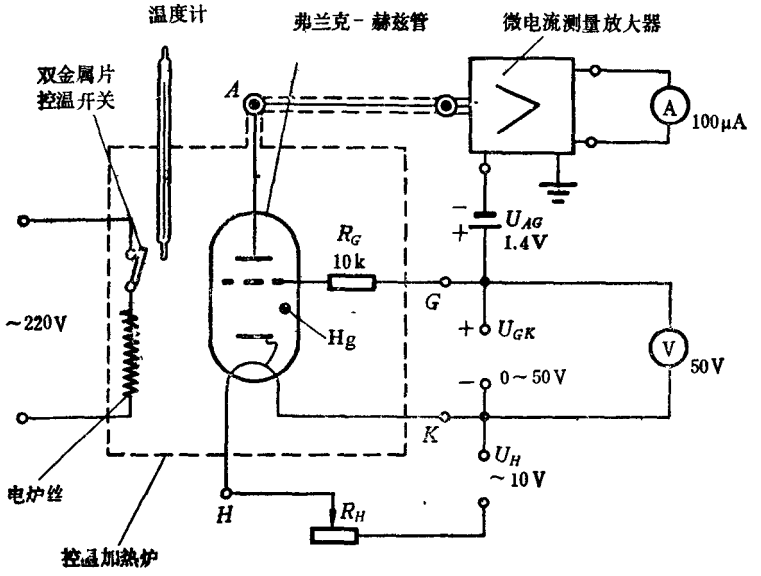


图 2-1 弗兰克-赫兹实验装置

逐渐增加栅极电压U_{GK}，观测阳极电流I_A随U_{GK}的变化。可以给出I_A～U_{GK}曲线如图2-3所示。

从图2-3曲线可以找出以下规律：

（1）电流不是单调地上升。曲线中间出现多次凹陷。有若干极大值与极小值。

（2）相邻的二极大值或极小值对应的U_{GK}之差都是4.9伏，只有第一峰值点电位不是4.9伏。这可以解释成仪器接触电位差的存在，使整个曲线发生平移。以上规律可解释如下：

a.当$U_{GK}<4.9$伏时，电子的能量随U_{GK}的增大而增大，但是大部分电子不具有使汞

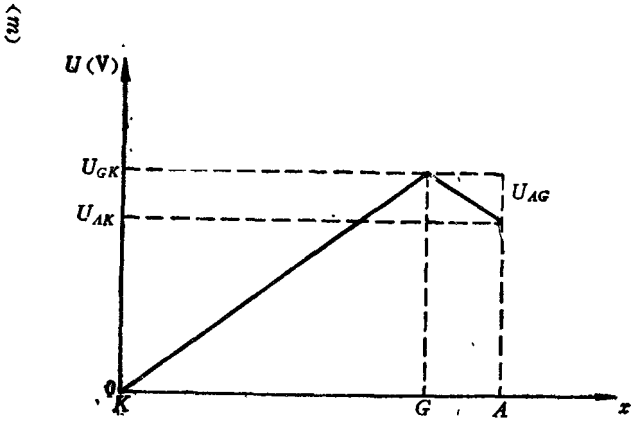


图 2-2　弗兰克-赫兹管内极间电位分布

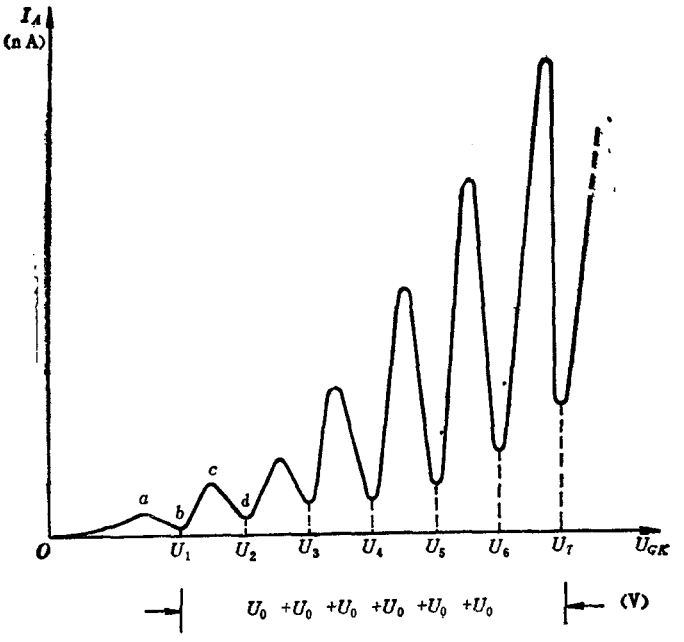


图 2-3　弗兰克-赫兹曲线

原子激发的动能，只能与汞原子发生弹性碰撞、碰撞后电子能量损失很小。如果子初速度的统计分布，可以解释板极电流I_A随U_{GK}的增加而单调的上升。当U_{GK}达到4.9伏时，那些在栅极附近与汞原子发生碰撞的电子，由于其能量已经大于或等于eU_0，能将汞原子从基态激发到第一激发态。碰撞使电子动能大部分损失掉。这样的电子将没有能力越过拒斥电场达到阳极。I_A将显著下降。

b.如果U_{GK}继续增加到大于4.9伏时，电子在没到达栅极之前就可能有足够的能量与汞原子发生非弹性碰撞。碰撞后电子还可以继续被U_{GK}加速。这样一来，到达栅极时，电子重新又积累起穿过拒斥电场的能量。这就解释了*bc*段I_A的上升趋势。当$U_{GK}=2\times4.9$伏时，很多电子在*KG*空间可能与汞原子发生第二次非弹性碰撞，从而再度失去穿越拒斥电

场的能力．于是I_A再度下降，曲线出现第二个凹陷．以此类推，可以解释曲线其它极值的产生．从以上解释中自然地得出结论：汞原子的第一激发电位值为4.9伏。

处于激发态的汞原子经一短暂的时间会自发返回基态；同时有量值等于4.9eV的能量以光波形式辐射出来．光频率由(1)式给出：

$$eU_0 = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

波长

$$\lambda = \frac{hc}{eU_0} = \frac{6.63\times10^{-34}\times3.00\times10^{8}}{4.9\times1.6\times10^{-19}}\text{(m)}$$

$$=2.5\times10^{3}\text{(Å)}$$

实验测量从弗兰克-赫兹管中辐射出的一光波波长为2537A。与弗兰克-赫兹实验的测算结果相符。

实验时，需使弗兰克-赫兹管维持一定温度。由于管内装有足够的液态汞，温度一定时，饱和态的汞蒸气有确定的密度．因此电子与汞原子的碰撞有较确定的几率．这样可以测得稳定的弗兰克-赫兹曲线。但是实验温度不能太低，否则汞蒸气密度太小．电子与汞原子碰撞的平均自由程太大．在U_{GK}较高时，两次碰撞之间积累的能量可能将汞原子电离．这时I_A突然急剧增大，这就可能损坏仪器。

弗兰克-赫兹管内也可充入其它元素。这样，用同样的实验装置，可测得其它元素的第一激发电位．如果充入氖、氩等气体，可以在常温下作弗兰克-赫兹实验，并测得氖、氩原子的第一激发电位．

将弗兰克-赫兹管加以改进，可测得汞原子高激发态的电位。

由弗兰克-赫兹实验可以看到，原子激发到不同状态时，吸收一定数值的能量，这些数值是不连续的．足见原子的内部能量是量子化的，也就是说确实证实了原子能级的存在。

【实验装置】

整套实验装置见图2-4，其主要部件为：

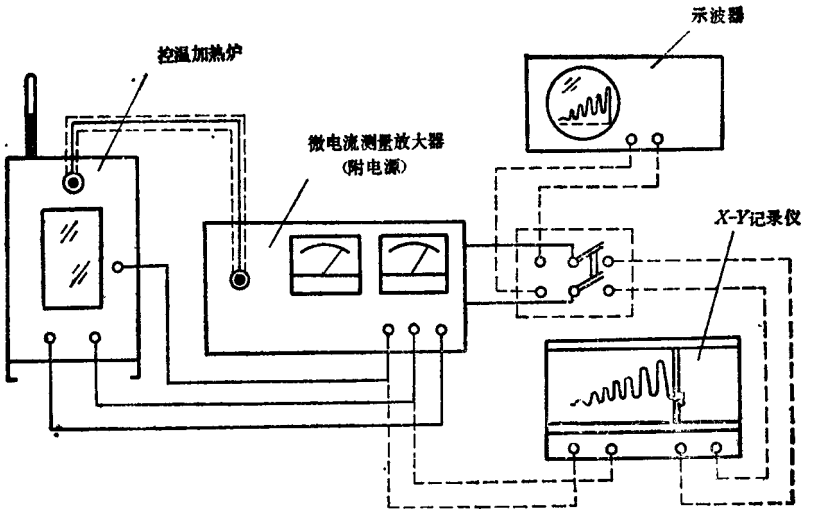


图 2-4　弗兰克-赫兹实验接线图

1.弗兰克-赫兹管；

2.控温加热炉；

3.微电流测量放大器

4.弗兰克-赫兹管电源；

5.示波器（超低频）；

6.X-Y记录仪。

有的厂家把3、4两部分作成一个仪器（见图2-5）。

微电流测量放大器的功能是将阳极电流放大，然后由直流电流表显示读数。放大器的放大倍数可调节。弗兰克-赫兹管电源提供管子的灯丝电压U_H、栅极电压U_{GK}、拒斥电压U_{AG}，三者的大小均可调节。U_{GK}的调节有两种形式：①由电位器手动调节；②由锯齿波电压自动调节。自动调节部分用于示波器显示或X-Y记录仪描绘弗兰克-赫兹曲线。

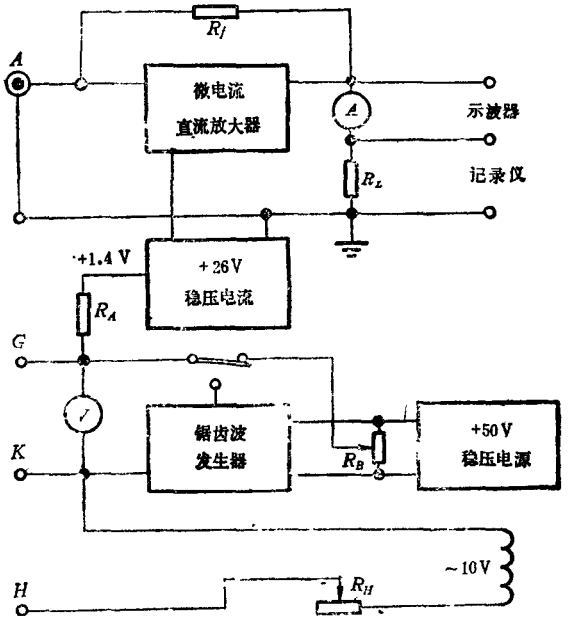


图 2-5 微电流测量放大器框图

【实验内容】

1.测量汞原子的第一激发电位U。

用手动档调节栅压U_{GK}。先进行一次粗略和全面的观察，然后使U_{GK}从零开始逐渐增加，逐点测试对应不同电压的电流。要特别注意与电流峰值（和谷值）对应的电压。

2.用示波器或X-Y记录仪进行曲线的观察和描绘。

3.改变炉温和灯丝电压进行重复测量和观察。

4.数据处理要求：

①利用所测数据画出一条弗兰克-赫兹曲线。

②利用测得的对应电流峰值（或谷值）的各电压值，用最小二乘法原理，求汞的第

需要全本请访问 www.ertongbook.com

一激发电位U_0及接触电位差U_c。

提示：关于最小二乘法原理，参见本书附录II。令$U_c=b_0$，各电流峰值（谷值）点的U_{GK}为y，$U_0=b_1$，而各点的序号为x。则

$$y=b_0+b_1x$$

由附录II之公式（12）、（13）及（20），可分别算出U_0、U_c以及回归系数γ。利用γ值可以验证线性关系

$$U_{GK}=U_c+U_0x$$

是否成立。

5.利用实验结果讨论选用不同炉温对弗兰克-赫兹曲线形状的影响，并给予解释。

【预习思考问题】

1.未达到最底实验温度之前就给管子灯丝加电压并加上较高的栅压，将会造成什么问题？

2.实验温度的高低对弗兰克-赫兹曲线形状会有什么影响？

3.如果在实验过程中,发现管内呈现较强的辉光,同时电流急剧增加,这是出现了什么问题?这时应如何操作？

【实验技术与注意事项】

1.连接测试仪与管子间的联线时，注意A、G、H、K必须一一对应，不可混接或短路。

2.使用测试仪时，应先调好“零点”和“满度”（见仪器说明书）测量过程中，注意根据情况随时调整放大器的放大倍率。

3.由于有热惯性的影响，调整炉温后，需过一会，炉温稳定后才能测量；由于同一原因，在改变灯丝电压后，也需等一、二分钟，待灯丝电流稳定后，才能测量。

4.炉温过低时，不可加灯丝电压和栅压。

5.灯丝温度的选取，以充分利用放大器的功能后能满足测量要求为准，可适当把灯丝电压选得低些（一般在6.3伏左右）。

6.加热炉外壳温度很高，小心避免灼伤。

【参考文献】

[1]褚圣麟《原子物理学》,人民教育出版社,2.5，42（1979）

实验三　电子电荷的测量（密立根油滴法）

电子是人类认识的第一个基本粒子。作为这一认识过程的先驱者，首先应该提到$J.J$汤姆孙（J.J.Thomson）。他在1897年测定了阴极射线的电荷与质量比e/m（电子的荷质比），从而以无可辩驳的实验事实证明了电子的存在。接着，美国杰出的物理学家密立根（R.A.Millikan）在前人工作的基础上，经过多年努力终于成功地采用油滴法精确测定了电子的电量（1911年），并且令人信服地揭示了电结构的量子本性。

今天我们重温这一著名的油滴实验，不仅应该一般地了解密立根所用的基本实验方法，更要借鉴与学习他采用宏观的力学模式揭示微观粒子量子本性的物理构思、精湛的实验设计和严谨的科学作风，从而更好地提高我们的实验素质和能力。

【实验目的】

1.验证电荷的不连续性；

2.测定电子的电荷；

【实验原理】

油滴法测定电子电荷，是从观察和测定带电油滴在电场中的运动规律入手的。当油滴经喷雾器喷出时，细微的油滴由于摩擦一般都已带电。如果将一质量为m，电荷量为 q 的油滴引入一组水平放置、间距为 d、所加电压为U的平行极板之间（图3-1），油滴将同时受到重力（mg）和电场力 $\left(qE=q\frac{U}{d}\right)$ 的作用，E为平行平板间的电场强度。如果适当选择电压的大小和方向，使电场力的方向与重力方向相反而量值相等，即二者量值为

$$mg=q\frac{U_n}{d} \qquad (1)$$

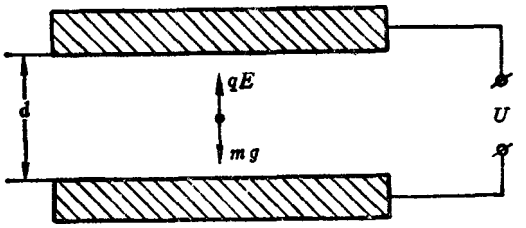


图 3-1

油滴就会相对静止地悬浮在电场中并保持平衡。测出该油滴质量 m、平衡电压U_n和平行平板间距 d，则由

$$q=mg\frac{d}{U_n} \qquad (2)$$

就可求得油滴的电荷量 q。

实验证明，对于同一个油滴，如果分别使它的电荷量为q_1，q_2，q_3，…，则能够使油滴在电场中平衡的电压U_{1n}，U_{2n}，U_{3n}…只是一些不连续的特定值，这个事实揭示了电荷存在着最小的基本单元，油滴带的电荷量只能是最小电荷单元 e 的整数倍。即

$$q=ne \qquad (n=\pm1、\pm2\cdots)$$

实验中测出电荷量q_1，q_2，q_3…然后求它们的最大公约数。这个最大公约数就是 e —— 电子的电荷。

公式（2）中油滴的质量 m的数量级大约在10^{-15}千克左右，对于这样细微的油滴质量进行直接测量是极为困难的。但是注意到油滴喷出后，在表面张力作用下，一般都呈圆球状。因此

$$m=\frac{4}{3}\pi a^3\rho \qquad (3)$$

式中 ρ 为油的密度；a 为油滴半径。它的数值同样很难直接测量但却可以通过研究油滴在空气这一粘滞介质中的运动规律来间接测量。

油滴在空气中自由下落时将同时受到重力 $f=mg=\frac{4}{3}\pi a^3\rho g$、空气浮力 $f_1=\frac{4}{3}\pi a^3\rho'$（$\rho'$为空气密度）及空气对它的粘滞摩擦阻力$f_2$的作用。由 Stokes定律知粘滞摩擦阻力

$$f_2=6\pi a\eta v \qquad (4)$$

式中 η 为空气的粘滞系数；v为油滴下落速度。当油滴速度增大到某一值v_s时，重力与粘滞摩擦阻力、浮力相平衡，油滴将匀速下降。即：

$$\frac{4}{3}\pi a^3\rho g=\frac{4}{3}\pi a^3\rho'+6\pi a\eta v_s \qquad (5)$$

整理(5)式可得

$$a=\sqrt{\frac{9}{2}\frac{\eta v_s}{g(\rho-\rho')}} \qquad (6)$$

一般来说$\rho\gg\rho'$。亦即空气对油滴的浮力是可以忽略的，因此 (6)式可写为

$$a=\sqrt{\frac{9}{2}\frac{\eta v_s}{g\rho}} \qquad (7)$$

另一方面油滴又是如此细微，它的直径已与空气分子之间的间隙相当．因此已不能把空气看作是连续、均匀的介质了。在这种情况下Stokes定律应修正为

$$f_2=\frac{6\pi a\eta v}{1+\frac{b}{Pa}} \qquad (8)$$

式中$b=6.17\times10^{-5}$ 米 ·毫米汞柱；P为大气压强，单位为毫米汞柱。修正后

$$a=\sqrt{\frac{9}{2}\frac{\eta v_s}{g\rho\left(1+\frac{b}{Pa}\right)}} \qquad (9)$$

(9) 式右端仍含有未知量 a，但因它处于修正项 $1+\frac{b}{Pa}$中，因此不需要十分精确，由(7) 式算出后代入即可。

将(9) 式代入(3) 式可得油滴质量

$$m=\frac{4}{3}\pi\rho\left[\frac{9\eta v_s}{2\rho g}\cdot\frac{1}{\left(1+\frac{b}{Pa}\right)}\right]^{\frac{3}{2}} \qquad (10)$$

再将(10) 式代入(2) 式即得油滴的电荷量

$$q=ne=\frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}\frac{d}{U_n}\left[\frac{\eta v_s}{\left(1+\frac{b}{Pa}\right)}\right]^{\frac{3}{2}} \qquad (11)$$

式 (11) 中油滴匀速下降的速度v_s可以通过观测油滴匀速下落一段固定距离 L所用时间 t 来测定。即

$$v_s=\frac{L}{t} \tag{12}$$

因而

$$a=\sqrt{\frac{9\eta L}{2\rho g t}} \tag{13}$$

将式（12）、（13）代入式（11），得

$$q=ne=\frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}\frac{d}{U_n}\left[\frac{\eta L}{t\left(1+\frac{b}{P}\sqrt{\frac{2\rho g t}{9\eta L}}\right)}\right]^{\frac{3}{2}} \tag{14}$$

或

$$q=ne=\frac{A}{[t(1+B\sqrt{t})]^{3/2}}\cdot\frac{1}{U_n} \tag{15}$$

式中

$$A=\frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}(\eta L)^{\frac{3}{2}}d \tag{16}$$

$$B=\frac{b}{P}\sqrt{\frac{2\rho g}{9\eta L}} \tag{17}$$

式（16），（17）中，ρ，g，η，P，b，d，L均为与实验条件或实验仪器有关的常数参量，故A，B亦为常数。因此由（15）式可见，欲测一颗给定油滴的电荷量q，只需在图3-1所示实验装置中测出它的平衡电压U_n，然后撤去电压，让它在空气中自由下落，并在下落速度达到均匀后，测出下落距离L所用时间t即可。

为了验证电荷的不连续性，实验中需要改变油滴的电荷量。为此可以用X射线或放射源发出的射线使平行平板之间的空气电离。当带电油滴在上下极板之间运动过程中与某一个正（或负）离子相结合时，则电荷量就发生变化。如果实验室没有为你准备X射线设备或放射源，你可用变换不同带电油滴的方法来进行验证。必须指出的是，为了得到可靠的实验结果，除了每次测量都应该严格认真进行以外，还必须耐心地对同一油滴反复多次测量，以避免自然涨落的影响。

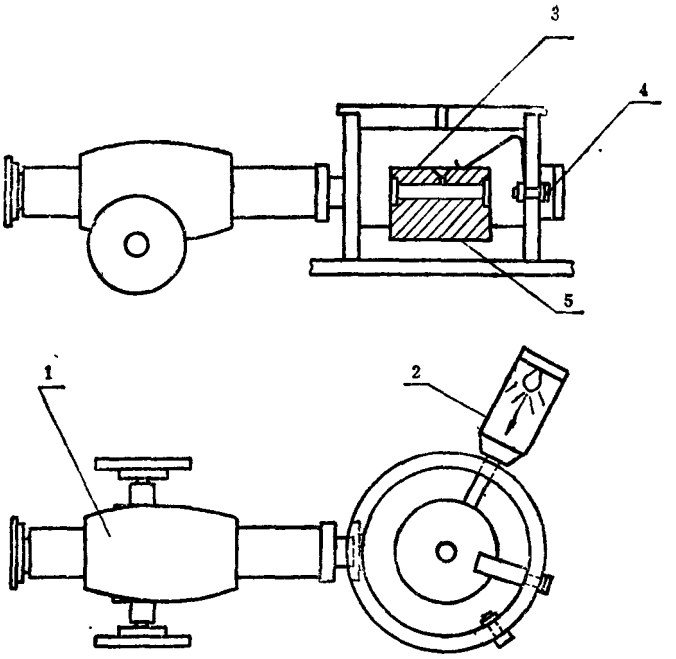
【实验装置】

油滴实验装置由油滴仪、电源、计时仪器、喷雾器及其它辅助设备等组成。

I，油滴仪：它的原理结构如图3-2所示，可视为由三大部分组成：

1.平行电极：油滴仪的核心部分是两块平行放置，间距d约几毫米的金属圆电极板。在上电极板中央有一个小孔，喷雾器喷出的油滴由小孔落入两极板之间。实验中平行电极间的电场方向应与重力方向平行，亦即平行电极板必须水平放置。为此目的，油滴仪上设置有调节螺钉和水准仪。实验开始时，首先应把这项调节认真作好。

2.显微镜：用来观察和测量油滴的运动规律。显微镜的目镜中装有一分划板。在目镜视野中观察到的视野如图3-3所示，分划板上每格相当于显微镜视场中的实际距离为l，如果我们在显微镜的视野上观察一颗匀速下降的油滴，并测出它下降i格（即实际下降距离为$L=il$）所用时间t，则油滴匀速下降速度



1—显微镜；2—照明系统；3—平行上电极；4—电极引线孔；5—平行下电极；

图 3-2　油滴仪基本结构图

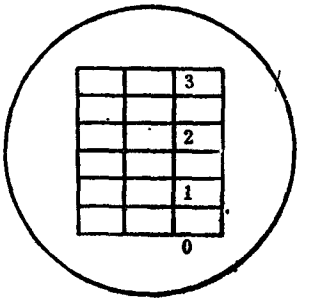


图 3-3　目镜中观察到的视野

$$v_g=\frac{L}{t}=\frac{il}{t} \qquad (18)$$

即可求得。应该注意，显微镜中观察到的像是倒立像，因此匀速下落的油滴， 在显微镜中看来是在匀速上升。

3.照明系统：光源发出的光束照射到油滴区，经油滴散射后，在显微镜内就可以看到黑暗的背景上明亮而清晰的油滴在运动。为了防止光照引起油滴区的空气产生热扰动，入射光束一般都先经过吸热水槽或导光玻璃棒导引再射入油滴区。

II、电源：它是一台输出电压为数百伏的直流稳压电源，它的作用是为被研究的带电油滴在电场中静止提供“平衡电压”U_n，或使带电油滴在电场力作用下按实验需要运动到便于研究，观察的位置。由此可见。这台直流稳压电源必须是（ 1 ）输出电压的大小可以连续调节；（ 2 ）输出电压的数值需有电压表精确测量；（ 3 ）由于油滴电荷可正、可负，因此必须用一个换向开关改变输出电压的极性，以改变电场方向。

III、其它辅助设备：

在连续测量过程中如想改变油滴的电荷量，可用 X 射线或放射线照射油滴区。详细使用办法及注意事项可见实验室实验指导书。

【实验中应注意的问题】

油滴实验是一个操作技巧要求较高的实验。为了使你得到满意的实验结果，你在实验中必须注意：

1.首先要调节调平螺丝，将平行电极板调到水平位置，使平衡电场方向与重力平行。

以免引起实验误差。

2.为了使显微镜迅速、准确地调焦在油滴区，实验时可先将一调焦针（一根金属细丝）由平行电极上极板中央进油小孔插入，然后调节显微镜，直到清晰地看清调焦针的边缘轮廓为止。在调焦过程中，由于上、下极板处于短路状态，因此外加电压必须为零。否则将损坏电源或危及人身安全。

调焦后的显微镜，在观察油滴时一般还需适当作一些微调（如果你在跟踪观察某一油滴时，原来清晰的像突然变模糊了，试分析，这是什么原因引起的？）。

3.实验油滴的挑选：喷雾器喷出的油滴其质量与电荷量都各不相同。其中只有那些质量适中而电荷量不多的油滴才是合用的。油滴质量太大，则必须使电荷量很多才能取得平衡，从而使得结果不易测准。质量太小，则易受热扰动等的影响，测量结果涨落很大，同样不易测准。应该充分认识到实验油滴选择是否恰当，将是决定实验成败的重要因素之一。

请读者认真思考并在实验中实践一下如何从众多的油滴中定性判断它的体积的大小和电荷量的多寡。

4.实验油滴的控制：测量数据之前，你应该学会熟练控制油滴的本领。包括驱散不需要的油滴；找到需要的油滴，并使它在电场中平衡；使油滴匀速下降并在它到达视野边缘时使它上升或移位到所需要的位置等等。

5.为了测定油滴的电荷量，实验中我们只需直接测量平衡电压$U_{内}$和油滴下落L距离所用时间t两个物理量即可。但是必须注意，观察油滴是否平衡，需要足够的时间。观察油滴下落的区域L，也必须选在显微镜视场的分划板中央。请读者思考一下为什么必须这样做？

6.长时间监测一个油滴，你会发现由于油的挥发，它的质量会不断下降。实验前你能否估计一下，油滴的挥发将使哪些测量值发生变化？

【实验内容】

1.观察带电油滴自由下落及在电场中运动的规律。练习选择、控制油滴的技巧。

2.选取合适的油滴，测定它的电荷量。每个油滴至少测量五次以上。

3.改变油滴的电荷量或选用不同的油滴至少做五次。

4.求出电子电荷量并根据测量和仪器误差情况估算出Δe。最后与公认值$e=1.602\times10^{-19}$库仑比较，作出适当的结论。

实验四　光电效应法测普朗克常数

从上世纪以来，人们对光电效应现象的研究，曾对量子理论的发展起过重要的推动作用。美国科学家密立根经过十年的努力，终于用实验验证了爱因斯坦光电效应方程，并且第一次直接从光电效应测定了普朗克常数。在本次实验中，我们可以了解到密立根实验所

需要全本请访问 www.ertongbook.com