

实验五 磁聚焦法测定电子荷质比

带电粒子的电量与质量的比值称荷质比，是带电微观粒子的基本参量之一。荷质比的测定在近代物理学的发展中具有重大的意义，是研究物质结构的基础。1897年，汤姆逊(J.J. Thomson)正是在对“阴极射线”粒子荷质比的测定中，首先发现电子的。测定荷质比的方法很多，汤姆逊所用的是磁偏转法，本实验采用了磁聚焦法。

【实验目的】

1. 学习测量电子荷质比的方法；
2. 了解带电粒子在电磁场中的运动规律及磁聚焦原理。

【实验原理】

1. 示波管的简单介绍

本实验所用的8SJ31型示波管的构造及有关几何参数如图1所示。

阴极K是一个表面涂有氧化物的金属圆筒，经灯丝加热后温度上升，一部分电子逸出后脱离金属表面成为自由电子发射。自由电子在外电场作用下形成电子流。栅极G为顶端开有小孔的圆筒，套在阴极之外，其电位比阴极低，使阴极发射出来具有一定初速的电子，通过栅极和阴极间的电场时减速。初速大的电子可以穿过栅极顶端小孔射向荧光屏，初速小的电子则被电场排斥返回阴极。如果栅极所加电位足够低，可使全部电子返回阴极。这样，调节栅极电位就能控制射向荧光屏的电子射线密度，即控制荧光屏上光点的亮度，这就是亮度调节。记符号为“ \odot ”。

为了使电子以较大的速度打在荧光屏上，使荧光物质发光亮些，在栅极之后装有加速电极，相对于阴极，其电压一般为1KV至2KV。加速电极是一个长形金属圆筒，筒内装有具有同轴中心孔的金属膜片，用于阻挡离开轴线的电子，使电子射线具有较细的截面。加速电极之后是第一阳极 A_1 和第二阳极 A_2 。第二阳极通常和加速电极相连，而第一阳极对阴极的电压一般为几百伏特。这三个电极所形成的电场，除对阴极发射的电子进行加速外，并使之会聚成很细的电子射线，这种作用称为聚焦作用。改变第一阳极的电压，可以改变电场分布，使电子射线在荧光屏上聚焦成细小的光点，这就是聚焦调节，记符号为“ \odot ”。当然，改变第二阳极的电压，也会改变电场分布，从而进一步改变电子射线在荧光屏上聚焦的好坏，这是辅助聚焦调节，记符号为“ \circ ”。

为使电子射线能够达到荧光屏上的任何一点，必须使电子射线在两个互相垂直的方向上都能偏转，这种偏转可以用静电场或者磁场来实现。一般示波管采用静电场使电子射线偏转，称静电偏转。静电偏转所需要的电场，由两对互相垂直的偏转板提供。其中一对能使电子射线在X方向偏转，称X向偏转板 D_x 。另一对能使电子射线在Y方向偏转，称Y

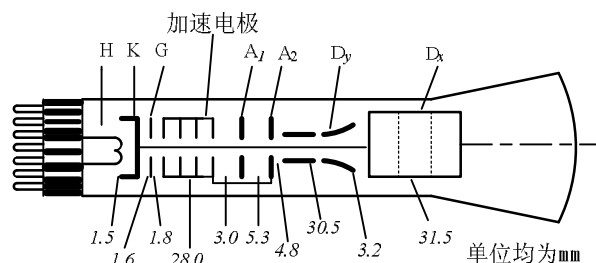


图1 示波管结构

向偏转板 D_y .

2. 电子射线的磁聚焦原理 (偏转电场为零).

(1)

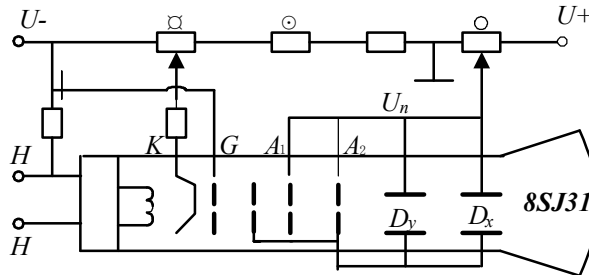


图2 偏转电场为零时接线图

若将示波管的加速电极、第一阳极 A_1 、第二阳极 A_2 、偏转电极 D_x 和 D_y 全部连在一起, 并相对于阴极 K 加同一加速电压 U_a , 这样电子一进入加速电极就在零电场中作匀速运动, 如图2所示. 这时来自电子射线第一聚焦点 F_1 (在栅极 G 的小圆孔前方) 的发散电子射线将不再会聚, 而在荧光屏上形成一个光斑. 为了能使电子射线聚焦, 可在示波管外套一个通用螺线管, 使在电子射线前进的方向产生一个均匀磁场, 磁感应强度为 B . 在 8SJ31 型示波管中, 栅极和加速电极很靠近, 仅 1.8 mm. 因此, 可以认为电子离开第一聚焦点 F_1 后立即进入电场为零的均匀磁场中运动.

(2) 在均匀磁场 B 中以速度 v 运动的电子, 受到洛仑兹力 F 的作用

$$F = -ev \times B \quad (1)$$

当 v 和 B 平行时, F 等于零, 电子的运动不受磁场的影响, 仍以原来的速度 v 作匀速直线运动. 当 v 和 B 垂直时, 力 F 垂直于速度 v 和磁感应强度 B , 电子在垂直于 B 的平面内作匀速圆周运动, 如图3(a)所示 (图中的 F 和 v 只表示作大圈运动电子的洛仑兹力和速度的方向). 维持电子作圆周运动的力就是洛仑兹力, 即

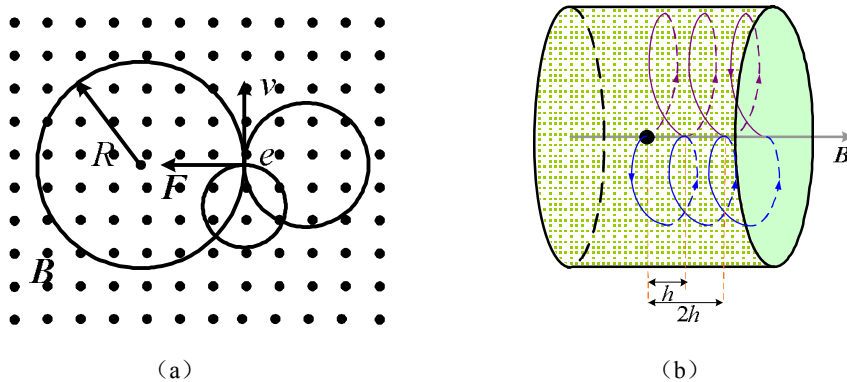


图3 磁聚焦原理图

$$F = evB = m \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

电子运动轨道的半径为

$$R = \frac{mv}{eB} \quad (3)$$

电子绕圆一周所需的时间（周期） T 为

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{eB} \quad (4)$$

从（3）、（4）两式可见，周期 T 和电子速度 v 无关，即在均匀磁场中不同速度的电子绕圆一周所需的时间是相同的。但速度大的电子所绕圆周的半径也大。因此，已经聚焦的电子射线绕一周后又将会聚到一点。

（3）在一般情况下，电子束呈圆锥形向荧光屏运动，如电子速度 v 和磁感应强度 B 之间成一夹角，此时可将 v 分解为与 B 平行的轴向速度 $v_{//}$ ($v_{//} = v\cos\theta$) 和与 B 垂直的径向速度 v_{\perp} ($v_{\perp} = v\sin\theta$)，两部分如图 3 (b) 所示。 $v_{//}$ 使电子沿轴方向作匀速运动，而 v_{\perp} 在洛伦兹力的作用下使电子绕轴作圆周运动，合成的电子轨迹为一螺旋线，其螺距为

$$h = v_{//}T = \frac{2\pi m}{eB} v_{//} \quad (5)$$

对于从第一聚焦点 F_1 出发的不同电子，虽然径向速度 v_{\perp} 不同，所走的圆半径 R 也不同，但只要轴向速度 $v_{//}$ 相等，并选择合适的轴向速度 $v_{//}$ 和磁感应强度 B （改变 v 的大小，可通过调节加速电压 U_a ；改变 B 的大小可调节螺线管中的励磁电流 I ），使电子在经过的路程 l 中恰好包含有整数个螺距 h ，这时电子射线又将会聚于一点，这就是电子射线的磁聚焦原理。

【实验内容】

1. 零电场法测定电子荷质比

（1）原理

电子速度 v 由加速电压 U_a 决定（电子离开阴极时的初速度相对来说很小，可以忽略），即

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_a \quad (6)$$

因 θ 角 (见图 3) 很小, 近似

$$v_{//} \approx v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}} \quad (7)$$

可见电子在均匀磁场中运动时, 具有相同的轴向速度. 但因 θ 角不同, 径向速度将不同. 因此, 它们将以不同的半径 R 和相同的螺距 h 作螺旋运动. 经过一个周期的时间 T 后, 在

$$h = \frac{2\pi m}{eB} v$$

的地方聚焦. 调节磁感应强度 B 的大小, 使螺距 h 好等于电子射线第一聚焦点 F_1 光屏之间的距离 l , 这时在荧光屏上的光斑将聚焦成一个小亮点, 于是

$$l = h = \frac{2\pi m}{eB} v = \frac{2\pi m}{eB} \sqrt{\frac{2eU_a}{m}} \quad (8)$$

故电子荷质比

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_a}{l^2 B^2} \quad (9)$$

如继续增大 B , 使电子流旋转周期相继减小为上述的 $1/2, 1/3, \dots$, 则相应电子在磁场作用下旋转 2 周, 3 周, \dots 后聚焦于荧光屏上, 称为二次聚焦, 三次聚焦, \dots . 对于 n 次聚焦, $\frac{e}{m}$ 的计算公式为

$$\frac{e}{m} = n^2 \frac{8\pi^2 U_a}{l^2 B^2} \quad (10)$$

而有限长螺线管轴线中点的磁感应强度

$$B = \frac{\mu_0 \eta I L}{\sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 N I L}{L \sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 N I}{\sqrt{L^2 + D^2}}$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米 N — 螺线管总匝数

L — 螺线管长度

D — 螺线管直径 I — 励磁电流强度

$\eta = \frac{N}{L}$ 单位长度线圈匝数

则 (10) 式化为

$$\frac{e}{m} = n^2 \frac{8\pi^2 U_a}{l^2 u_0^2 N^2 I^2} (L^2 + D^2) \quad (11)$$

若 I 用安培, U_a 用伏特, l 用米, N 用匝数, 则
则 (117) 式化简为

$$\frac{e}{m} = n^2 \frac{U_a (L^2 + D^2)}{2l^2 N^2 I^2} \times 10^{14} \quad (\text{c/kg}) \quad (12)$$

式中 N 、 l 、 L 、 D 都由实验室提供, 只需测量出 U_a 、 I , 就能利用 (12) 计算电子荷质比.

(2) 步骤

a. 按图 2 连接电路. 选定加速电压 U_a (850 V, 950 V).

b. 测定第一次、第二次、第三次聚焦时的励磁电流 I_1' 、 I_2' 和 I_3' . 为了减少误差, 各测六次, 求平均值 I_i' .

c. 改变螺旋管磁场方向, 分别记录下聚焦时的励磁电流 I_1'' 、 I_2'' 和 I_3'' . 各测六次, 并算出平均值 I_i'' .

d. 分别计算出第一次、第二次、第三次聚焦时的励磁电流值 I_1 、 I_2 、 I_3 ($I_i = \frac{I_i' + I_i''}{2}$). 然

后将 I_1 、 I_2 、 I_3 折算为第一次聚焦时的平均励磁电流 I , 即平均值 $I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{1 + 2 + 3}$. 根据公

式 (12) 计算出电子荷质比, 并与理论值比较.

2. 电场偏转法测定电子荷质比

(1) 原理

零电场法是使电子进入加速电极后在零电场中作螺旋线运动. 改变磁感应强度 B , 使电子射线前进的螺距 h 恰好等于示波管第一聚焦 F_1 , 到荧光屏之间的距离 l , 由此测定电子荷质比.

如图 4 所示, 电场偏转法是在示波管的偏转板 (图为 X 偏转板, 而此刻 Y 偏转板与变压器中心抽头连在一起, 并接到第二阳极 A_2 上, 保持与 A_2 有相同的电位. 以防杂散电子散落在 Y 偏转板上, 产生附加电场) 上加以交流电压, 使电子获得偏转速度 v_x . 在螺线管未通电流时, 因电子射线偏转而在荧光屏上出现一条亮线. 接通励磁电流后, 不同偏转速度 v_x 的电子将沿不同的螺旋线运动, 但在荧光屏上所见的轨迹仍是一条亮线. 随着磁感应强度 B 的逐渐增大, 亮线开始转动, 并逐渐缩短, 如图 5 所示. 当转过角度 π 时, 亮线缩成一点, 这是因不同偏转速度

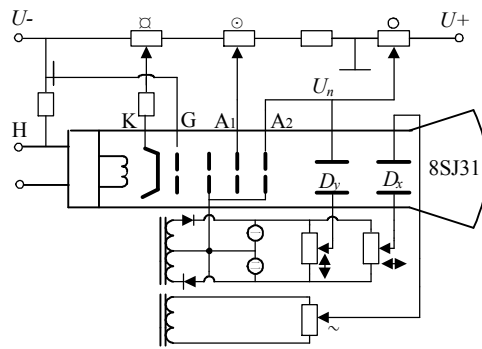


图 4 电场偏转法接线图

而在荧光屏上出现一条亮线. 接通励磁电流后, 不同偏转速度 v_x 的电子将沿不同的螺旋线运动, 但在荧光屏上所见的轨迹仍是一条亮线. 随着磁感应强度 B 的逐渐增大, 亮线开始转动, 并逐渐缩短, 如图 5 所示. 当转过角度 π 时, 亮线缩成一点, 这是因不同偏转速度

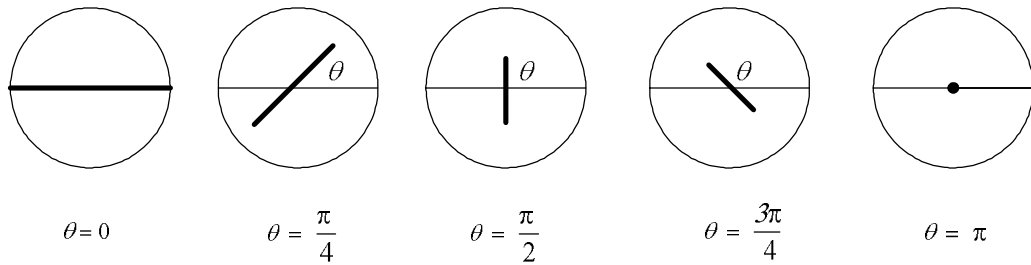


图5 电偏转示意图

v_x 的电子经过一个螺距 h 后又会聚在一起的原因。故第一次聚焦时，螺距 h 在数值上等于 X 偏转板到荧光屏的距离 l ，与 (9) 式相似，电子荷质比为

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_a}{l^2 B^2} \quad (13)$$

在此请注意， l 值虽也是第一次聚焦时螺旋线的一个螺距 h ，但螺旋线的起点和 (9) 式中螺旋线的起点不同，是在偏转板中，但在偏转板的什么位置却不明确。而且螺旋线的起点会不会随加速电压 U_a 的改变而发生变化，也不明确。一般的教材都将螺旋线的起点从偏转板的中点算起，这是一种折衷的办法。根据图 18SJ31 型示波管的几何参数，经计算，X 偏转板的中间位置到荧光屏的距离 $l_{\text{中}} = 0.107\text{m}$ 。如以 X 偏转板的后沿（离荧光屏最远）到荧光屏的距离计算，则 $l_{\text{后}} = 0.123\text{m}$ 。为计算方便，实验前可先计算出相关的计算系数，由下式表示

$$\left(\frac{e}{m}\right)_{l_{\text{中}}} = \frac{8\pi^2 U_a}{l_{\text{中}}^2 B^2} = c_1 \frac{U_a}{l^2} \quad (c_1 \text{ 为计算系数})$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_{l_{\text{后}}} = \frac{8\pi^2 U_a}{l_{\text{后}}^2 B^2} = c_2 \frac{U_a}{l^2} \quad (c_2 \text{ 为计算系数})$$

如果亮线对 X 轴的旋转角不是 π 而是 θ ，例如 $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{\pi}{2}$ ，按比例 (13) 式应改为

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{l^2} \left(\frac{\theta}{B}\right)^2 \quad (14)$$

经反复实验，螺旋线的起点位置是似应相当于在 $l_{\text{中}}$ 和 $l_{\text{后}}$ 之间，并随加速电压 U_a 的改变而变化。

(2) 步骤

- a. 预习时，根据实验原理，计算出当 θ 转过 $\pi/4$ ， $\pi/2$ 和 π 并缩成一点时，电子比荷

计算公式中的系数，列于表 1.

- b. 按图 4 连接电路.
- c. 建议参见数据表 2 进行实验.
- d. 讨论实验结果，并试着指出螺旋线起点位置约在什么地方.
- e. 试在 Y 偏转板上加交流偏转电压做相似实验. 并与用 X 偏转板做的实验进行对比探讨.

【实验仪器】

EMB-2 型电子射线、电子荷质比测定仪：励磁螺线管、示波管和直流稳压，电源换向开关等.

本实验仪器的参数如下：

$$N = 1596 \text{ 匝} \quad L = 0.260 \text{ m} \quad D_{\text{内}} = 0.090 \text{ m} \quad D_{\text{外}} = 0.098 \text{ m}$$

$$l = 0.199 \text{ m} \quad l_{\text{中}} = 0.107 \text{ m} \quad l_{\text{后}} = 0.123 \text{ m}$$

表 1

θ	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	π
系数 ($\times 10^8(\text{米/亨})^2$)			
c_1			1.31
c_2			1.00

表 2

θ	U_a (V)	I (A)	$(\frac{e}{m})_{\text{前}} (c \cdot \text{kg}^{-1})$	$(\frac{e}{m})_{\text{后}} (c \cdot \text{kg}^{-1})$
$\frac{\pi}{4}$	850			
	950			
$\frac{\pi}{2}$	850			
	950			
π	850			
	950			

【注意事项】

1. 改变加速电压后荧光亮度会改变，应重新调节亮度勿使亮点过亮. 一则容易损坏荧光屏，同时亮点过亮，聚焦好坏不易判断. 调节亮度后加速电压也可能有变化，再调到规定的电压值即可.
2. 实验中要注意维持加速电压为一定值.
3. 螺线管的轴线要沿地球磁场的南北方向安放.
4. 螺线管不要长时间通以大电流，以免线圈过热.

【预习题】

1. 为什么螺线管磁场要反向测量后求平均磁感应强度来计算 e/m ?
2. 如何判断一次聚焦、二次聚焦、三次聚焦.

【思考题】

试讨论 l 和 I 的测量误差对实验结果的影响.